

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

REINALDO CARLOS BREVILIERI

**CARBONO, NITROGÊNIO E FLUXOS DE N_2O E CH_4 EM LATOSSOLO
SUBTROPICAL SOB SISTEMAS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO**

CURITIBA

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

REINALDO CARLOS BREVILIERI

**CARBONO, NITROGÊNIO E FLUXOS DE N₂O E CH₄ EM LATOSSOLO
SUBTROPICAL SOB SISTEMAS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Co-orientadores: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Pesq. Dr. Gabriel Barth

CURITIBA

2016

B846 Brevilieri, Reinaldo Carlos

Carbono, nitrogênio e fluxos de N_2O e CH_4 em Latossolo subtropical sob sistemas de preparo e níveis de adubação. / Reinaldo Carlos Brevilieri. Curitiba: 2016.
xiii, 86 f. il.

Orientador: Jeferson Dieckow

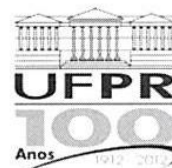
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

1. Plantio direto. 2. Solos – Teor de carbono. 3. Solos – Teor de nitrogênio. 4. Aquecimento global. I. Dieckow, Jeferson.
II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CDU 631.51:631.92



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado

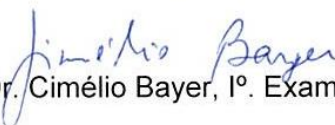


PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Tese de Doutorado de **REINALDO CARLOS BREVILIERI**, intitulada: "**Carbono, nitrogênio e fluxos de N_2O e CH_4 em Latossolo subtropical sob sistemas de preparo e níveis de adubação**", do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela "**APROVAÇÃO**" da referida Tese. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 26 de abril de 2016.


Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente


Prof. Dr. Cimélio Bayer, Iº. Examinador


Dr. Gabriel Barth, IIº. Examinador


Dra. Josiléia Acordi Zanatta, IIIº. Examinador


Prof. Dr. Volnei Pauletti, IVº. Examinador

Ao único Deus e nosso Senhor e Salvador Jesus Cristo pela infinita misericórdia e
amor abençoando meus objetivos.

Aos meus queridos pais, Renato Brevilieri e Ivone Gomes, e ao irmão Redney,
grandes incentivadores desse propósito, sempre dispostos, compreensivos, uma dedicação
especial à minha mãe pelas palavras de ajuda e conforto nos momentos mais difíceis e pelas
orações ao meu favor.

À minha namorada Fernanda Araújo por se apresentar na minha vida na parte final
desse curso de doutorado, sendo compreensiva nas várias horas frente ao computador,
respeitando, acreditando, e já compartilhando sonhos.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus todo poderoso e nosso Senhor Salvador Jesus Cristo, por abençoar meu propósito e por cada degrau subido nessa caminhada científica, muita coisa evoluiu desde então, contudo há muito ainda pra melhorar, estarei sempre disposto.

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, unidade de Aquidauana, pela minha formação em Agronomia e mestrado em Produção Vegetal, em especial aos professores orientadores Marcos Antonio Camacho da Silva (graduação) e Julio César Salton (mestrado), profissionais que me serviram de exemplo.

Ao meu orientador e amigo professor Jeferson Dieckow, pela orientação, incentivo, transparência, confiança, respeito e paciência, sendo fundamental sua colaboração em cada etapa desse trabalho de tese.

À banca avaliadora de minha qualificação no doutorado pelos questionamentos e sugestões que foram utilizados no decorrer desse trabalho, muito obrigado Dra. Josiléia Acordi Zanatta (Embrapa), Dr. Julio César Salton (Embrapa) e Dr. Volnei Pauletti (UFPR).

À Fundação ABC para Pesquisa e Divulgação Técnica pela parceria, permissão de utilização de sua área experimental e total colaboração nas atividades de campo, em especial aos amigos Dr. Gabriel Barth (pesquisador) e ao Luiz Carlos Costa (técnico).

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul de Porto Alegre, em especial ao professor Dr. Cimélio Bayer, Dra. Daiane Carvalho dos Santos e Dra. Cecília Sacramento no amparo às análises cromatográficas.

A todos os colegas mestrando e doutorando do grupo de Manejo do Solo UFPR, em especial a Bruna Ramalho, Carol Amadori, Julia Dias, Maico Pergher, Mariana Ibarra, Murilo Veloso-Gomes e Priscila Simon e aos estagiários Diego Rocha, Wellison Cerqueira, Felipe Knopik, Anderson Maoski (presente em várias coletas), em especial agradeço aos amigos estagiários Michael Kreusch e ao Bruno Pereira, grandes parceiros, que estiveram praticamente em todas as viagens a campo e nunca mediram esforços em ajudar. Sentirei saudades do grupo de Manejo do Solo, foi uma honra trabalharmos juntos!

Ao amigo professor Antonio Neri Azevedo Rodrigues pelos ensinamentos, maturidade e convivência por quase quatro anos.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná pelos valiosos ensinamentos e total prestatividade e também aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, em especial à secretária

Denise (sempre sorridente e comunicativa além de muito prestativa), à Marla (DSEA), ao Sr. Aldair, Sr. Roberto, Eveline, Fabiana, à Maria Aparecida (Lab. Mineralogia) e a Josi (Lab. Física). Agradeço também ao colega Dr. Hilbert Blum pelos auxílios prestados em laboratório e discussões proveitosas frente aos dados laboratoriais.

A todos os colegas da Pós-Graduação pelo convívio, amizade e parceria, sobretudo das turmas de mestrado e doutorado de 2012.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realização desse trabalho, a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante todo o curso que permitiu a realização desse trabalho de Tese.

A todos meus familiares e amigos pelo suporte, força, incentivo e compreensão.

MUITO OBRIGADO!

*“Na confusão busca-se a simplicidade, na discórdia busca-se a harmonia, na
dificuldade reside a oportunidade”.*

Albert Einstein

“... Até aqui nos ajudou o Senhor.”

I Samuel 7:12

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1. CARBONO E NITROGÊNIO EM LATOSSOLO SOB SISTEMAS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO	7
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	9
1.1. INTRODUÇÃO	11
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
1.2.1. Área experimental.....	12
1.2.2. Carbono orgânico total e nitrogênio total do solo	13
1.2.3. Análise estatística	14
1.3. RESULTADOS	14
1.3.1. Densidade do solo.....	14
1.3.2. Carbono Orgânico Total e Nitrogênio Total do solo.....	17
1.3.3. Efeito da adubação.....	21
1.4. DISCUSSÃO	21
1.5. CONCLUSÕES	25
1.6. AGRADECIMENTOS	25
1.7. LITERATURA CITADA.....	25
CAPÍTULO 2. EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM LATOSSOLO E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO	32
RESUMO.....	32
ABSTRACT.....	34
2.1. INTRODUÇÃO	36
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.2.1. Área experimental.....	37
2.2.2. Sistemas de preparo do solo e adubação	38

2.2.3. Emissões de N ₂ O e CH ₄ do solo	38
2.2.4. Atributos de solo	40
2.2.6. Análise estatística	42
2.3. RESULTADOS	42
2.3.1. Emissão de N ₂ O e CH ₄	42
2.3.2. Atributos de solo	45
2.3.3. Precipitação e temperatura do ar	53
2.3.4. Custo de operações e insumos agrícolas em C-CO ₂ -eq	56
2.3.5. Potencial de aquecimento global (PAG)	58
2.4. DISCUSSÃO	59
2.4.1. Emissão de N ₂ O e CH ₄	59
2.4.2. Atributos de solo	61
2.4.3. PAG	62
2.5. CONCLUSÕES	63
2.6. AGRADECIMENTOS	63
2.7. LITERATURA CITADA	63
CONCLUSÕES GERAIS	71
APÊNDICE	72

CARBONO, NITROGÊNIO E FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM LATOSSOLO SUBTROPICAL SOB SISTEMAS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO¹

Autor: Reinaldo Carlos Brevilieri

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

RESUMO GERAL

O plantio direto (PD) potencializa o acúmulo de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo e pode mitigar a emissão de gases de efeito estufa (GEE) em relação ao preparo convencional (PC). O objetivo do estudo foi avaliar a influência de sistemas conservacionistas de preparo do solo e níveis de adubação no sequestro de C e acúmulo de N em Latossolo, e na mitigação de GEE pela determinação do PAG, num experimento implantado em 1989. Para sequestro de C e acúmulo de N foram selecionados quatro sistemas de preparo do solo: plantio direto (PD), plantio direto com escarificação trianual (PDE), preparo mínimo com gradagens (PM), e preparo convencional com aração e gradagem (PC), sendo esses sistemas combinados com dois níveis de adubação: normal, com fertilização recomendada desde 1989, e reduzida, supressão total de fósforo (P) e potássio (K), mas com a mesma adubação nitrogenada em cobertura que a normal, desde 1993. A coleta de solo em 0-100 cm de profundidade ocorreu em maio de 2013, quando o experimento completou 24 anos. Para determinação do PAG foram selecionados os sistemas PD, PDE e PC em adubação normal. Amostras de ar foram coletadas num período de monitoramento de 835 dias, incluindo duas safras de verão e três safras de inverno. O sistema de culturas do experimento engloba soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e milho (*Zea mays* L.), no verão; trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), essa para cobertura, e branca (*Avena sativa* L.), para grãos, no inverno. O delineamento experimental foi blocos ao acaso em três repetições e tratamentos dispostos em faixas. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). O solo em PD sequestrou 0,60 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 30 cm na adubação normal, e 0,76 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 100 cm na adubação reduzida em relação ao solo em PC, e o acúmulo de NT foi 34,6 e 27,5 kg ha⁻¹ano⁻¹, até 10 cm nas adubações normal e reduzida, respectivamente. O comportamento do solo em PDE foi similar ao do PD, a taxa de sequestro foi 0,61 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 45 cm na adubação normal, e 0,77 Mg COT ha⁻¹

¹ Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (77 p.) Abril, 2016.

ano^{-1} , até 100 cm na adubação reduzida, e o acúmulo de NT foi 20,0 e 18,8 kg NT $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, até 10 cm nas adubações normal e reduzida, respectivamente. O solo em PM praticamente não acumulou COT nem NT em relação ao solo em PC. A adubação normal aumentou as taxas de sequestro de COT até 10 cm no solo em PD (0,27 Mg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), e PDE (0,13 Mg COT $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e em PC (0,15 Mg COT $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$). No solo em PM (0,08 Mg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) houve efeito de adubação apenas na camada de 10-20 cm. Por efeito de adubação, houve maior acúmulo de NT no solo em PD (14,5 kg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) até 10 cm, no solo em PDE (5,0 kg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) na camada de 5-10 cm, e no solo em PM (5,0 kg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e PC (4,0 kg $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), exclusivamente até 5 cm. A emissão acumulada média anual de N_2O no período avaliado, em kg de N- N_2O ha^{-1} , foi maior no solo em PC (9,2), e menor no solo em PD (6,2) e PDE (6,7). Elevados fluxos de N_2O ocorreram após preparo do solo (convencional ou escarificação), semeadura e adubação nitrogenada na semeadura; após adubação nitrogenada em cobertura, principalmente; e na senescência da soja. O consumo acumulado médio anual de CH_4 , em kg de C- CH_4 ha^{-1} , foi maior no solo em PD (7,0) e PDE (5,9), possivelmente pela melhor condição estrutural do solo que estimulou a metanotrofia, e menor no solo em PC (3,7). Efluxos de CH_4 ocorreram após adubações nitrogenadas, principalmente, e preparos de solo. Com relação ao PAG, todos os sistemas agiram como fonte de GEE, em C- $\text{CO}_2\text{-eq}$ ha^{-1} , mas PD, com 571,4 kg C- $\text{CO}_2\text{-eq}$ $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ apresentou o menor PAG e PDE, com 662,2 kg C- $\text{CO}_2\text{-eq}$ $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, um PAG próximo ao PD enquanto o maior PAG foi obtido no PC (1648,1 kg C- $\text{CO}_2\text{-eq}$ $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$). O maior PAG obtido no PC deve-se a maior emissão de N_2O e elevados custos operacionais, enquanto o menor PAG no PD e PDE foi pelo sequestro de C e menor emissão de N_2O . Conclui-se que sistemas conservacionistas de preparo, como plantio direto ou plantio direto escarificado, acumulam COT e NT, favorecendo o estoque de matéria orgânica no solo (MOS). Resultados indicam que PD e PDE atuam como fonte de GEE não representando uma real contribuição na mitigação do aquecimento global, entretanto são estratégias eficientes para reduzir emissões de GEE em relação ao PC.

Palavras-chave: plantio direto, escarificação do solo, sequestro de C, acúmulo de N, potencial de aquecimento global.

CARBON, NITROGEN AND FLUXES OF NITROUS OXIDE AND METANO IN SUBTROPICAL OXISOL UNDER TILLAGE SYSTEMS AND FERTILIZER LEVELS²

Author: Reinaldo Carlos Brevilieri

Advisor: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

GENERAL ABSTRACT

*The No-till (NT) promotes the accumulation of carbon (C) and nitrogen (N) in the soil and can mitigate greenhouse gas (GHG) emissions compared to conventional tillage (CT). The aim of this study was to evaluate the influence of conservation of tillage and fertilization levels systems in the potential sequestration of C and N accumulation in Oxisol, and GHG mitigation for determining the PAG, an experiment implemented in 1989. For sequestration of C and N accumulation were selected four tillage systems: No-till (NT), tillage with chiseling every three years (NTch), minimum tillage with harrowing's (MT), and conventional tillage with plowing and harrowing (CT). These systems were combined with two fertilization levels: normal, with fertilization recommended since 1989, and reduced, total suppression of phosphorus (P) and potassium (K), but with the same nitrogen fertilization in coverage than normal fertilization since 1993. The collection of soil, in 0-100 cm, occurred in May 2013, when the experiment turned 24 years. In determining the PAG were selected NT, NTch and CT systems under normal fertilization. Air samples were collected in 835 days monitoring period, including two summer seasons and three winter seasons. The experimental cultures system comprises soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and maize (*Zea mays* L.), in summer; and wheat (*Triticum aestivum* L.) and black oat (*Avena strigosa* Schreb.) to coverage, and white oat (*Avena sativa* L.) to grain, in winter. The experimental design was a randomized complete block design with three replications and treatments arranged in strips. The results were submitted to variance analysis and averages between treatments compared by Tukey test ($p < 0.10$) and the CT system was adopted as the baseline. The soil in NT sequestered $0.60 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ relative to soil in CT, up to 30 cm in the normal fertilization, and $0.76 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to 100 cm in reduced fertilization. The TN accumulation was 34.6 and 27.5 kg $\text{ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ relative to soil in CT, up to 10 cm in normal and reduced fertilization, respectively. The NTch behavior was similar to NT, the sequestration rate was $0.61 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, to 45 cm in the normal fertilization, and $0.77 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to 100 cm in reduced*

² *Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (77 p.) April, 2016.*

fertilization, and TN accumulation was 20.0 and 18.8 kg ha⁻¹year⁻¹, to 10 cm in normal and reduced fertilization, respectively. The soil in PM hardly accumulated TOC or TN in relation to soil in CT. The Normal fertilization increased the TOC sequestration rates up to 10 cm in relation to soil in NT (0.27 Mg ha⁻¹year⁻¹) and NTch (0.13 Mg ha⁻¹year⁻¹) and CT (0.15 Mg ha⁻¹year⁻¹). In the soil in MT (0.08 Mg ha⁻¹ yr⁻¹) there was fertilization effect only in the 10-20 cm layer. The normal fertilization increased TN accumulation in the soil in NT (14.5 kg ha⁻¹ year⁻¹) up to 10 cm, in the soil in NTch (5.0 kg ha⁻¹ year⁻¹) in the 5-10 cm layer, and in MT (5.0 kg ha⁻¹yr⁻¹) and CT (4.0 kg ha⁻¹yr⁻¹), only to 5 cm. The average annual cumulative N₂O emissions during this period, in kg N-N₂O ha⁻¹ was higher in the soil in CT (9.2), and lower in NT soil (6.2) and NTch soil (6.7). The high N₂O fluxes occurred after tillage (conventional or chiseling), sowing and nitrogen fertilizer at sowing; after nitrogen fertilization coverage, especially; and senescence in soybean. The average annual accumulated consumption of CH₄, in kg of C-CH₄ ha⁻¹, was higher in NT soil (7.0) and NTch (5.9), possibly the best soil structural conditions that stimulated methanotrophy and lower in PC soil (3.7). Efflux of CH₄ occurred after nitrogen fertilization mainly and soil tillage. For PAG, all systems acted as a source of GHG, in C-CO₂-eq ha⁻¹, but the NT system, with 571.4 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ yr⁻¹ had the lowest GWP and PDE with 662.2 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ yr⁻¹, a GWP near the NT while the larger GWP was obtained in CT (1648.1 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ yr⁻¹). The biggest GWP presented by CT due to increased N₂O emissions and high operating costs, while the lowest GWP obtained by the NT and NTch was the lower N₂O emissions and C sequestration, though it had the input costs equal to the CT.

Keywords: no-till, chisel plowing, C sequestration, N accumulation, global warming potential.

INTRODUÇÃO GERAL

O aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera tem causado o chamado efeito estufa antrópico, e umas das principais consequências é o aumento médio da temperatura do planeta ou aquecimento global. De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), as emissões globais de GEE provenientes da agricultura em 2010 foi estimada entre 5,2 a 5,8 Gt CO₂eq (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente) ao ano e correspondem de 10 a 12% das emissões antrópicas.

No Brasil, o setor agropecuário, ao lado do setor energia, é o que mais emite gases causadores do efeito estufa, contabilizando 37 % das emissões em CO₂eq. Nesse setor, solos agrícolas respondem por 35,9 % através de emissões diretas (animais em pastagem, fertilizantes sintéticos, aplicação de adubo, resíduos agrícolas e solos orgânicos), e indiretas (deposição atmosférica e lixiviação) (MCTI, 2014).

Solos agrícolas bem manejados podem mitigar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) através do sequestro de carbono (C) (Lal, 2004). Sistemas conservacionistas de preparo do solo, como plantio direto (PD), aliado a sistemas de rotação de culturas com elevado aporte de C favorecem o acúmulo de C no solo (Bayer et al., 2000; Amado et al., 2006; Cerri et al., 2010). No PD, o incremento no acúmulo de C no solo não é restrito às camadas superficiais, mas pode ocorrer também nas camadas mais profundas (Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2005; Baker et al., 2007; Boddey et al., 2010; Albuquerque et al., 2015), diferente do resultado encontrado por Poirier et al (2009), que não encontrou maior acúmulo em profundidade entre PD e sistema convencional. Em adição ao manejo conservacionista, o acúmulo de C no solo pode ser obtida por diferenças na adição de N via fertilizante, isso está relacionado ao maior desenvolvimento vegetativo da parte aérea e raízes (Bayer et al., 2000; Vanderbygaart et al., 2003; Lovato et al., 2004; Diekow et al., 2005; Zanatta et al., 2007; Nunes et al., 2011).

No cenário agrícola brasileiro, apenas o sequestro de C não é uma forma definitiva de mitigação do aquecimento global por sistema de uso e manejo, a determinação dos fluxos de óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) é muito importante, embora emitidos em quantidades relativamente menores que o CO₂, apresentam potenciais de aquecimento 310 e 21 vezes, respectivamente, superiores ao do CO₂ pelo maior forçamento radiativo (MCTI, 2014).

Com relação ao N₂O, autores indicam que PD aumenta a emissão pelo favorecimento da desnitrificação, principal processo de formação de N₂O, pela maior umidade e densidade

do solo e menor porosidade de aeração (Mackenzie et al., 1997; Ball et al., 1999; Baggs et al., 2003; Escobar et al., 2010). Na literatura, emissões similares entre PD e preparo convencional (PC) também foram encontradas nas regiões Subtropical (Jantalia et al., 2008) e Tropical (Metay et al., 2007; Siqueira-Neto et al., 2011). Em contrapartida, estudos recentes indicam menor emissão de N_2O em solos manejados sob PD comparado ao convencional (Passianoto et al., 2003; Malhi et al., 2006; Chatskikh e Olesen, 2007; Gregorich et al., 2008; Ussiri et al., 2009; Mutegi et al., 2010; Petersen et al., 2011; Piva et al., 2012) e as razões da menor emissão podem estar associadas ao não revolvimento do solo pela diminuição das taxas de mineralização dos resíduos e preservação da estrutura do solo.

Com relação ao CH_4 , a emissão ou absorção pelo solo é regulada pelos processos microbiológicos de produção (metanogênese) e de oxidação (metanotrofia) (Hutsch, 1998). Solos aerados são importantes sumidouros de CH_4 , pois favorecem as bactérias metanotróficas, aeróbias, capazes de utilizar esse gás como fonte de C e energia. Maior emissão de CH_4 no solo em PC pode estar relacionada à incorporação de resíduos responsáveis pela sua decomposição, favorecendo liberação de compostos orgânicos para a metanogênese, ou ainda modificar a estrutura do solo de forma a comprometer a difusão de CH_4 .

Apenas o sequestro de C não é uma forma definitiva de mitigação do aquecimento global por um sistema de uso e manejo. Aliado a isso deve existir um balanço nos fluxos de N_2O e CH_4 para obtenção do potencial de aquecimento global (PAG) do sistema (Robertson et al., 2000; Six et al., 2004; Mosier et al., 2005). O PAG, expresso em $kg\ C-CO_2eq\ ha^{-1}ano^{-1}$, é o balanço entre o sequestro de C no solo, os custos de operação e insumo, e as emissões acumuladas de N_2O e CH_4 .

O sistema PD ocupa aproximadamente 32 milhões de hectares da área agrícola nacional (Febrapdp, 2012), levando em consideração essa expressividade, julgam-se necessários melhores esclarecimentos quanto ao potencial de acúmulo de C e N no solo, no âmbito de aumentar os estoques de matéria orgânica no solo (MOS), e também na mitigação de GEE pela determinação do PAG para estabelecer estratégias mitigadoras no setor agropecuário além de fornecer resultados mais consistentes de emissões brasileiras no cenário mundial.

LITERATURA CITADA

ALBURQUERQUE, M. A., DIECKOW, J., SORDI, A., PIVA, J. T., BAYER, C., MOLIN, R.,

- PERGHER, M., RIBEIRO-JUNIOR, P. J. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. *Soil Use Manag.*, 31:1–9, 2015.
- AMADO, T. J., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P. C., SPAGNOLLO, E., COSTA DE CAMPOS, B.H. e DA VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *Journal of Environmental Quality* 35, 1599–1607, 2006.
- BAGGS, E. M.; STEVENSON, M.; PIHLATIE, M.; REGAR, A.; COOK, H. e CADISCH, G. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. *Plant Soil*, 254:361-370, 2003.
- BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E., VENTEREA, R. T. e GRIFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration – What do we really know? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 118, 1-5, 2007.
- BODDEY, R. M.; CLAUDIA P. JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J. SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R. e URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biol.*, 16:784–795, 2010.
- BALL, B. C.; SCOTT, A. e PARKER, J. P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil Tillage Res.*, 53:29-39, 1999.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L. e FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54:101-109, 2000.
- CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; MAIA, S. M. F.; CERRI, C. E. P.; COSTA-JUNIOR, C.; FEIGL, B. J.; FRAZÃO, L. A.; MELLO, F. F. D.; GALDOS, M. V.; MOREIRA, C. S. e CARVALHO, J. L. N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. *Sci. Agric.*, 67:102-116, 2010.

- CHATSKIKH, D. e OLESEN, J. E. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil Tillage Res.*, 97:5-18, 2007.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. e KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil and Tillage Research*, 81:87-95, 2005.
- ESCOBAR, L. F.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; CHAVEZ, L. F.; ZANATTA, J. A. e FIORIN, J. E. Postharvest nitrous oxide emissions from a subtropical Oxisol as influenced by summer crop residues and their management. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 34:507-516, 2010.
- FEBRAPDP 2012. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Disponível em: www.febrapdp.org.br.
- GREGORICH, E. G.; ROCHETTE, P.; ST-GEORGES, P.; MCKIM, U.F. e CHAN, C. Tillage effects on N₂O emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 88:153-161, 2008.
- HÜTSCH, B. W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 27(3):284–292, 1998.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Chapter 11: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Work Group Team, Smith, P. e Bustamante, M., editors. Berlin, Germany; 2014. p. 1-181.
- JANTALIA, C. P.; DOS SANTOS, H. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. e ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82:161-173, 2008.
- LAL, R. Carbon emission from farm operations. *Enviroments International* 30:981-990, 2004.

- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. e VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:175–187, 2004.
- MACKENZIE, A. F.; FAN, M. X. e CADRIN, F. Nitrous oxide emission as affected by tillage, corn-soybean-alfalfa rotations and nitrogen fertilization. *Can. J. Soil Sci.*, 77:145-152, 1997.
- MALHI, S. S.; LEMKE, R.; WANG, Z. H. e CHHABRA, B. S. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil Tillage Res.*, 90:171-183, 2006.
- MCTI – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2ª ed. Brasília, 2014. 164p.
- METAY, A.; OLIVER, R.; SCOPEL, E.; DOUZET, J. M.; ALVES MOREIRA, J. A.; MARAUX, F.; FEIGL, B. J. e FELLER, C. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). *Geoderma*, 141:78-88, 2007.
- MOSIER, A.R.; HALVORSON, A.D.; PETERSON, G.A.; ROBERTSON, G.P. & SHERROD, L. Measurement of net global warming potential in three agroecosystems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 72:67-76, 2005.
- MUTEGI, J. K.; MUNKHOLM, L. J.; PETERSEN, B. M.; HANSEN, E. M. e PETERSEN, S.O. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. *Soil Biol. Biochem.*, 42:1701-1711, 2010.
- NUNES, R. S.; LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G. e MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1407-1419, 2011.
- PETERSEN, S. O.; MUTEGI, J. K.; HANSEN, E. M. e MUNKHOLM, L. J. Tillage effects on N₂O emissions as influenced by a winter cover crop. *Soil Biol. Biochem.*, 43:1509-1517, 2011.

- PIVA, J. T.; DIECKOW, D.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, T. e PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. *Plant Soil*, 361:359–373, 2012.
- POIRIER, V.; ANGERS, D. A.; ROCHETTE, P.; CHANTIGNY, M. H.; ZIADI, N.; TREMBLAY, G. e FORTIN, J. Interactive Effects of Tillage and Mineral Fertilization on Soil Carbon Profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:255-261, 2008.
- ROBERTSON, G. P.; PAUL, E. A. e HARWOOD, R. R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289:1922-1925, 2000.
- SIQUEIRA-NETO, M.; PICCOLO, M. D.; COSTA, C.; CERRI, C. C. e BERNOUX, M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 35:63-76, 2011.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. e BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 76:39-58, 2004.
- SIX, J.; OGLE, S. M.; BREIDT, F. J.; CONANT, R. T.; MOSIER, A. R. e PAUSTIAN, K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Glob. Change Biol.*, 10:155-160, 2004.
- USSIRI, D. A. N.; LAL, R. e JARECKI, M. K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil Tillage Res.*, 104:247-255, 2009.
- ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B. e MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil Tillage Research* 94(2): 510-519 2007.

CAPÍTULO 1. CARBONO E NITROGÊNIO EM LATOSSOLO SOB SISTEMAS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO

Autor: Reinaldo Carlos Brevilieri

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

RESUMO

O plantio direto (PD) contribui para o acúmulo de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo pela maior agregação através do não revolvimento. O objetivo do estudo foi avaliar o potencial de sequestro de C e acúmulo de N num Latossolo sob sistemas de preparo e níveis de adubação em experimento implantado em 1989, em Ponta Grossa - PR. Os tratamentos foram quatro sistemas de preparo do solo: o preparo convencional (PC), o preparo mínimo (PM), o plantio direto escarificado (PDE) e o plantio direto (PD), combinados com dois níveis de adubação, uma denominada normal, com fertilização recomendada desde 1989 e outra denominada reduzida, com supressão total de fósforo (P) e potássio (K), mas com adubação nitrogenada de cobertura igual da adubação normal, desde 1993. O sistema de culturas do experimento inclui soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e milho (*Zea mays* L.), no verão; e trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), essa para cobertura, e branca (*Avena sativa* L.) para grãos, no inverno. O delineamento experimental foi de blocos completos ao acaso com três repetições e tratamentos dispostos em faixas. A coleta do solo em 0-100 cm ocorreu em maio em 2013 quando o experimento completou 24 anos. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias entre os tratamentos comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,10$), sendo o sistema PC adotado como referência. O solo em PD sequestrou 0,60 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 30 cm na adubação normal, e 0,76 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 100 cm na adubação reduzida. O acúmulo de NT do solo em PD foi 34,6 e 27,5 kg ha⁻¹ano⁻¹, até 10 cm nas adubações normal e reduzida, respectivamente. O comportamento do solo em PDE foi similar ao do solo em PD, a taxa de sequestro foi 0,61 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 45 cm na adubação normal, e 0,77 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹, até 100 cm na adubação reduzida. O acúmulo de NT do solo em PDE foi 20,0 e 18,8 kg NT ha⁻¹ano⁻¹, até 10 cm nas adubações normal e reduzida, respectivamente. O solo em PM praticamente não acumulou COT nem NT comparado ao solo em PC. A adubação normal incrementou as taxas de sequestro de COT até 10 cm no solo em PD (0,27 Mg ha⁻¹ano⁻¹), em PDE (0,13 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹) e em PC (0,15 Mg COT ha⁻¹ano⁻¹). No solo em PM (0,08 Mg ha⁻¹ano⁻¹) houve efeito apenas na camada de 10-20 cm. A adubação normal aumentou o acúmulo de NT no solo em PD (14,5 kg ha⁻¹ano⁻¹)

até 10 cm, em PDE ($5,0 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) na camada de 5-10 cm, e no solo em PM ($5,0 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e PC ($4,0 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) até 5 cm. Com base nos resultados, conclui-se que plantio direto ou plantio escarificado são eficientes em acumular COT e NT no solo, sendo alternativas para manutenção de matéria orgânica no solo (MOS) e com reflexos positivos na mitigação do aquecimento global por redução na emissão de CO_2 .

Palavras-chave: plantio direto, plantio direto escarificado, agregação, sequestro de carbono, acúmulo de nitrogênio.

CHAPTER 1. CARBON AND NITROGEN IN OXISOL UNDER TILLAGE SYSTEMS AND FERTILIZATION LEVELS

Author: Reinaldo Carlos Brevilieri

Advisor: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

ABSTRACT

*The no-till (NT) contributes to the accumulation of carbon (C) and nitrogen (N) in the soil for most aggregation by not disturbance. The aim of the study was to evaluate the potential sequestration of C and N accumulation in Oxisol under tillage systems and fertilizer levels in experiment established in 1989 in Ponta Grossa-PR. The objective of the work was to evaluate the potential of C sequestration and N accumulation in subtropical Oxisol under tillage systems and fertilizer levels in experiment established in 1989, in Ponta Grossa-PR. The treatments were four tillage systems: conventional tillage (CT), minimum tillage (MT), no-till with chisel (NTch) and no-till (NT), on two levels of fertilization, a normal, with fertilization recommended since 1989 and another reduced, with total suppression of phosphorus (P) and potassium (K), but nitrogen fertilization coverage similar to normal fertilization since 1993. The cultures system includes soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and maize (*Zea mays* L.), in summer; and wheat (*Triticum aestivum* L.) and black oat (*Avena strigosa* Schreb.), for coverage, and white oat (*Avena sativa* L.), to grain, in winter. The experimental design was a randomized complete block design with three replications and treatments arranged in tracks. The collection of soil in 0-100 cm occurred in May 2013 when the experiment turned 24 years. The results were submitted to variance analysis and averages between treatments compared by Tukey test ($p < 0.10$), the CT system adopted by reference. The soil in NT sequestered $0.60 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, up to 30 cm in the normal fertilization, and $0.76 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to 100 cm in reduced fertilization. The accumulation of TN in PD soil was 34.6 and $27.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, up to 10 cm in normal and reduced fertilization, respectively. The NTch behavior was similar to NT, the sequestration rate was $0.61 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, to 45 cm in the normal fertilization, and $0.77 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to 100 cm in reduced fertilization. The accumulation of NTch soil was 20.0 and $18.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, to 10 cm in normal and reduced fertilization, respectively. The soil in MT hardly accumulated TOC or TN compared to CT soil. The normal fertilization increased the TOC sequestration rates up to 10 cm in NT soil ($0.27 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), NTch ($0.13 \text{ Mg TOC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and CT (0.15 Mg TOC*

ha⁻¹yr⁻¹). In PM soil (0.08 Mg TOC ha⁻¹ yr⁻¹) was effective only in the 10-20 cm layer. The normal fertilization increased TN accumulation in the soil in NT (14.5 kg ha⁻¹ year⁻¹) up to 10 cm, in the soil in NTch (5.0 kg ha⁻¹ year⁻¹) in the 5-10 cm layer, and in MT (5.0 kg ha⁻¹yr⁻¹) and CT (4.0 kg ha⁻¹yr⁻¹), only to 5 cm. Based on the results, it is concluded that the no-till and chiseling no-till are effective in accumulating TOC and TN in the soil, and alternatives for maintaining soil organic matter (SOM) and positive impact on the mitigation of global warming by reducing the emissions CO₂.

Keywords: *no-till, no-till chiseling, aggregation, carbon sequestration, nitrogen accumulation.*

1.1. INTRODUÇÃO

O solo é o maior reservatório de carbono (C) do ecossistema terrestre. Estimativas indicam que cerca de 1500 Pg de C estejam armazenados na matéria orgânica do solo (MOS) até 1 metro de profundidade (Janzen, 2006). Os estoques de C e nitrogênio (N) nos solos são influenciados pelo balanço entre a entrada, via resíduos, e pela perda, principalmente por mineralização. O manejo do solo através do preparo e sistemas de culturas atua diretamente nesse processo.

Nos sistemas conservacionistas de preparo do solo, a minimização das perdas da MOS por mineralização, atribuída ao não revolvimento, pode aumentar os estoques de C e N no solo (Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001). Quando solos agrícolas são bem manejados o sequestro de C mitiga emissões de CO₂ (Lal, 2004; Majumder e Kuzyakov, 2010). No plantio direto (PD), o maior estoque de C no solo, comparado ao preparo convencional (PC), está relacionado à preservação dos agregados pelo não revolvimento do solo (Six et al., 2002; Chung et al., 2008). A agregação é o principal mecanismo de estabilização do C no solo em PD nas regiões tropical e subtropical brasileira (Bayer et al., 2000; Six et al., 2002b; Six et al., 2004a; Diekow et al., 2005; Conceição et al., 2013). Essa barreira física dificulta a ação dos microrganismos decompositores da MOS (Tisdall e Oades, 1982).

No PD, a adubação mineral aliada à rotação de culturas otimizam a entrada de material orgânico pela maior produção de biomassa das plantas e, conseqüentemente, favorecem os estoques de MOS (Bayer et al., 2000; Gregorich et al., 2006). A adubação nitrogenada é diretamente relacionada ao sequestro de C e o acúmulo de N no solo por favorecer o desenvolvimento vegetativo das plantas (parte aérea e raízes) para maior produção de biomassa (Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2005; Zanatta et al., 2007).

No Brasil, aproximadamente 32 milhões de hectares das lavouras estão sob PD (Febrapdp, 2012). Dada à importância desse sistema, julgam-se necessários melhores esclarecimentos sobre os potenciais de acúmulos C e N em profundidade no solo com níveis de adubação, sobretudo em experimentos de longo período de duração com Latossolo, classe predominante no país (Embrapa, 2013).

O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de sequestro de carbono e acúmulo de nitrogênio de um Latossolo há 24 anos sob sistemas de preparo e há 20 anos sob níveis de adubação numa condição de clima subtropical da região Sul do Brasil.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Área experimental

O estudo foi realizado em experimento de longa duração (24 anos) instalado em 1989 na Estação Experimental da Fundação ABC para Pesquisa e Divulgação Técnica Agropecuária (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O, altitude de 910 m), em Latossolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa e Fundação ABC, 2001), derivado de folhelhos e siltitos da formação Ponta Grossa do período Devoniano, com textura argiloarenosa a argilosa, cuja distribuição granulométrica é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1. Distribuição granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Camada (cm)	Areia	Silte	Argila
	----- g kg ⁻¹ -----		
0-5	450 ± 37 ^a	110 ± 13	440 ± 37
5-10	438 ± 42	94 ± 19	468 ± 42
10-20	437 ± 41	125 ± 13	438 ± 29
20-30	459 ± 50	116 ± 8	425 ± 38
30-45	419 ± 38	122 ± 17	459 ± 37
45-60	418 ± 40	135 ± 22	448 ± 27
60-80	409 ± 32	156 ± 42	434 ± 70
80-100	386 ± 21	111 ± 7	503 ± 30

^a Desvio padrão

O clima local é subtropical (Cfb, Köppen) e o relevo suave ondulado. A vegetação original sob campo nativo teve conversão para lavoura em 1967. Arroz (*Oryza sativa* L.) foi cultivado no verão nos três primeiros anos e a área permanecia em pousio no inverno; nos anos seguintes foi cultivado trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão. Em 1981, a área passou a ser manejada sob plantio direto, com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para cobertura no inverno, e soja no verão, por sete anos consecutivos. No inverno de 1988, 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 400 kg ha⁻¹ de termo fosfato magnésiano (18% de P₂O₅ e 7% de magnésio) foram aplicados e incorporados com arado de aiveca a 30 cm de profundidade seguido de duas gradagens 12 cm antes de implantação do experimento, ocorrida em 1989.

O experimento consiste na combinação de quatro sistemas de preparo do solo com dois níveis de adubação, sendo esses níveis introduzidos no quarto ano do experimento. O

delineamento experimental é de blocos completos ao acaso com tratamentos dispostos em faixas e três repetições. O sistema de culturas do experimento inclui soja e milho (*Zea mays* L.) na proporção 2:1, no verão; trigo e aveia preta (cobertura), e branca (*Avena sativa* L.) para produção de grãos, no inverno.

Os sistemas de preparo do solo são:

- Preparo convencional (PC), considerado o sistema referência, com aração de discos a 20 cm de profundidade e duas gradagens de disco a 12 cm, antes de cada cultivo de inverno e de verão.
- Preparo mínimo (PM), com gradagem pesada a 15 cm de profundidade seguida de uma leve a 12 cm, antes de cada cultivo de inverno e de verão.
- Plantio direto escarificado (PDE), com dessecação por glifosato antes de cada semeadura, mas escarificação a 30 cm de profundidade a cada três anos antes da semeadura da cultura de inverno.
- Plantio direto (PD), com dessecação por glifosato antes de cada semeadura, sem preparo de solo.

Os níveis de adubação são:

- Normal, com trigo recebendo 300 kg ha⁻¹ de 10-20-20 na semeadura e 200 kg ha⁻¹ de uréia em cobertura; aveia branca com 300 kg ha⁻¹ de 10-20-20 na semeadura e 110 kg ha⁻¹ de uréia em cobertura; soja com 300 kg ha⁻¹ de 0-20-20 na semeadura; e milho com 300 kg ha⁻¹ de 12-32-00 + Zn (1%) na semeadura e 320 kg ha⁻¹ de uréia + 150 kg ha⁻¹ KCl em cobertura.
- Reduzida, sem as adubações de semeadura (supressão total de fósforo e potássio), mas com a mesma adubação nitrogenada de cobertura do tratamento com adubação normal.

1.2.2. Carbono orgânico total e nitrogênio total do solo

Amostras de solo das camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm foram coletadas em maio de 2013, entre a colheita de soja e semeadura de trigo, dois anos após a última escarificação em PDE, e em dois pontos por subparcela (duplicatas). Até 30 cm de profundidade, amostras foram escavadas com espátula, em área de 40 cm x 25 cm delimitada por um gabarito de metal ancorado ao solo a 5 cm de profundidade. De 30 a 100 cm de profundidade, amostras foram escavadas com trado rosca de 23 cm de diâmetro, em duas perfurações no fundo da trincheira aberta na etapa anterior. A espessura de cada camada e o prumo das paredes da trincheira foram cuidadosamente aferidos para se conhecer o

volume de cada amostra. Com balança digital portátil, cada amostra foi integralmente pesada a campo. Duas alíquotas foram então retiradas: uma para a determinação da umidade gravimétrica, após secagem a 105 °C; e outra, maior, para a determinação das concentrações de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) por combustão seca (Elementar Vario EL III), após secagem ao ar e moagem de uma alíquota até passar malha de 250 µm. Com informação de volume e massa seca de cada amostra, foi calculada a densidade do solo pelo método da escavação (Blake e Hartge, 1986).

Com base nas concentrações de COT e NT e na densidade do solo, foram calculados os estoques de COT e NT; que posteriormente foram corrigidos pela massa equivalente do solo no sistema referência, PC com adubação normal (Sisti et al., 2004). Taxa média anual de sequestro de COT no solo sob PM, PDE e PD foi calculada pela diferença entre o estoque de COT no solo destes sistemas e o estoque no solo sob PC, no mesmo nível de adubação, dividido pelos 24 anos de duração do experimento. Taxa de sequestro também foi calculada para o nível normal de adubação em relação ao reduzido, pela diferença entre o estoque de COT no solo em cada sistema de preparo divididos por 20 anos dos níveis de adubação. Taxas de sequestro entre sistemas de preparo e níveis de adubação foram calculadas para cada camada, e considerou-se como sequestro significativo só quando a diferença entre estoques foi significativa. Mesmos procedimentos foram usados nos cálculos das taxas médias anuais de acúmulo de NT.

1.2.3. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando o delineamento de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas com três repetições. Sistema de preparo do solo foi o fator de parcela e nível de adubação foi o fator de subparcela. As médias entre os tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). As análises foram realizadas com o programa estatístico SAS[®], versão 8.0 (SAS Institute Inc).

1.3. RESULTADOS

1.3.1. Densidade do solo

Na adubação reduzida, o solo em PD teve maior densidade até 60 cm, exceto em 30-45 cm, em relação ao solo em PM, e em 20-30 e 45-60 cm comparado solo em PC. O solo em PDE teve maior densidade em 0-5 e 20-30 cm, em relação ao solo em PM, e em 20-30 cm

comparado ao solo em PC. Na adubação normal, o solo em PD teve maior densidade até 20 cm, em relação ao solo em PM e PC. O solo em PDE foi similar ao PD, exceto na camada de 5-10 cm em relação ao PM. Solo em PD e PDE não diferiram nas adubações. A adubação praticamente não alterou a densidade do solo. Entre camadas, as mais adensadas foram 10-20 e 20-30 cm em todos os sistemas (Tabela 2).

TABELA 2. Densidade do solo, concentração de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) e relação C/N de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), preparo mínimo (PM), plantio direto escarificado (PDE) ou plantio direto (PD) combinados com adubação reduzida ou normal (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Camada (cm)	Adubação reduzida				Adubação normal			
	PC	PM	PDE	PD	PC	PM	PDE	PD
Densidade (Mg m ⁻³)								
0-5	0,85 AB ^a _a ^b	0,82 B a	0,95 A a	0,95 A a	0,82 B a	0,82 B a	0,92 A a	0,96 A a
5-10	1,08 AB a	1,02 B a	1,07 AB _b	1,19 A a	1,08 C a	1,09 BC a	1,18 AB _a	1,19 A a
10-20	1,21 AB a	1,16 B a	1,21 AB _a	1,25 A a	1,20 B a	1,18 B a	1,24 A a	1,24 A a
20-30	1,16 B b	1,15 B a	1,30 A a	1,32 A a	1,26 A a	1,26 A a	1,29 A a	1,20 A a
30-45	0,96 A a	0,96 A a	1,00 A a	1,01 A a	1,02 A a	1,01 A a	1,02 A a	1,06 A a
45-60	0,94 B a	0,95 B a	0,99 AB _a	1,04 A a	1,05 A a	1,04 A a	1,05 A a	1,09 A a
60-80	0,98 A a	0,99 A a	1,00 A a	1,02 A a	1,00 A a	1,00 A a	1,02 A a	1,00 A a
80-100	1,01 A a	1,01 A a	1,01 A a	1,03 A a	0,98 A a	1,01 A a	1,02 A a	0,99 A a
COT (g kg ⁻¹)								
0-5	23,5 D b	27,1 C a	32,3 B b	34,9 A b	27,7 C a	28,0 C a	35,3 B a	42,2 A a
5-10	22,8 B b	25,3 AB a	28,3 A b	26,8 A b	25,0 B a	26,0 B a	30,7 A a	30,3 A a
10-20	21,2 A a	21,4 A b	22,5 A a	22,9 A a	21,6 A a	22,7 A a	22,4 A a	22,5 A a
20-30	19,0 A a	19,0 A a	20,3 A a	21,0 A a	17,8 B a	17,9 B a	20,2 A a	19,6 A a
30-45	14,8 A a	16,4 A a	16,5 A a	15,9 A a	15,8 B a	16,1 B a	17,5 A a	16,4 B a
45-60	13,7 A a	15,2 A a	15,0 A a	14,6 A a	13,7 A a	14,3 A a	13,9 A a	14,2 A a
60-80	12,6 A a	13,4 A a	13,0 A a	13,2 A a	12,6 A a	12,7 A a	12,4 A a	13,0 A a
80-100	10,5 A a	10,8 A a	12,3 A a	12,1 A a	10,7 A a	11,3 A a	11,9 A a	12,6 A a
NT (g kg ⁻¹)								
0-5	1,81 D b	2,11 C b	2,49 B b	2,90 A b	2,02 C a	2,36 BC a	2,62 B a	3,28 A a
5-10	1,84 B a	1,94 AB _a	2,10 A b	2,14 A b	1,91 B a	2,09 AB a	2,31 A a	2,35 A a
10-20	1,51 A a	1,60 A a	1,53 A a	1,43 A a	1,59 A a	1,57 A a	1,54 A a	1,55 A a
20-30	1,23 A a	1,18 A a	1,23 A a	1,30 A a	1,18 A a	1,22 A a	1,22 A a	1,25 A a
30-45	0,88 A a	0,98 A a	0,97 A a	0,97 A a	0,91 A a	1,04 A a	0,94 A a	0,99 A a
45-60	0,83 A a	0,84 A a	0,85 A a	0,82 A a	0,80 A a	0,82 A a	0,79 A a	0,85 A a
60-80	0,69 A a	0,72 A a	0,74 A a	0,70 A a	0,69 A a	0,67 A a	0,68 A a	0,73 A a
80-100	0,59 A a	0,64 A a	0,64 A a	0,64 A a	0,60 A a	0,61 A a	0,61 A a	0,66 A a
C/N								
0-5	13,0 A a	12,8 A a	13,0 A a	12,0 A a	13,7 A a	11,9 A a	13,5 A a	12,9 A a
5-10	12,4 A a	13,2 A a	13,5 A a	12,5 A a	13,1 A a	12,4 A a	13,3 A a	12,9 A a
10-20	14,0 A a	14,8 A a	14,7 A a	16,0 A a	13,6 B b	14,5 A a	14,5 A a	14,5 A a
20-30	15,4 A a	16,1 A a	16,5 A a	16,2 A a	15,1 A a	14,7 A a	16,6 A a	15,7 A a
30-45	16,8 A a	16,7 A a	17,0 A a	16,4 A a	17,4 A a	15,5 A a	18,6 A a	15,7 A a
45-60	16,5 A a	18,1 A a	17,6 A a	17,8 A a	17,1 A a	17,4 A a	17,6 A a	16,7 A a
60-80	18,2 A a	18,6 A a	17,6 A a	18,9 A a	18,3 A a	19,0 A a	18,2 A a	17,8 A a
80-100	17,8 A a	16,9 A a	19,2 A a	18,9 A a	17,8 A a	18,5 A a	19,5 A a	19,1 A a

^a Letras maiúsculas na linha comparam sistemas de preparo no mesmo nível de adubação ($p < 0.10$, teste de Tukey). ^b Letras minúsculas na linha comparam níveis de adubação no mesmo sistema de preparo ($p < 0.10$, teste de Tukey).

1.3.2. Carbono Orgânico Total e Nitrogênio Total do solo

Em solo adubado normalmente, o PD aumentou a concentração (Tabela 2) e o estoque de COT (Tabela 3) em relação ao PC até 30 cm de profundidade, numa taxa de $0,60 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 4), sem efeito em camadas mais profundas. Com escarificação a cada 3 anos, ocorreu a mesma tendência de aumento de concentração e de estoque, inclusive com taxa muito similar de sequestro ($0,61 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), mas com efeito estendido até 45 cm (Tabela 4). Por outro lado, o PM praticamente não alterou a concentração e o estoque de COT em relação ao convencional, tendo somente um incremento de $0,06 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, restrito à camada de 10-20 cm (Tabelas 3 e 4).

TABELA 3. Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), preparo mínimo (PM), plantio direto escarificado (PDE) ou plantio direto (PD) combinados com adubação reduzida ou normal (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Camada (cm)	Adubação reduzida				Adubação normal			
	PC	PM	PDE	PD	PC	PM	PDE	PD
COT (Mg ha⁻¹)								
0-5	9,6 C ^a b ^b	11,0 BCa	13,2 ABb	14,2 A b	11,3 C a	11,4 C a	14,4 B a	17,2 A a
5-10	12,3 B b	13,7 B a	15,5 A b	15,0 A b	13,5 B a	14,1 B a	16,8 A a	17,3 A a
10-20	25,5 B a	25,6 B b	27,4 A a	27,9 A a	25,8 B a	27,2 A a	27,7 A a	27,8 A a
20-30	24,1ABa	23,9 B a	25,8 A a	26,8 A a	22,6 B a	22,6 B a	25,8 A a	25,3 A a
30-45	22,4 B a	24,6 B a	25,7 A a	25,4 A a	24,1 B a	24,6 B a	27,3 A a	25,5 ABa
45-60	21,4 B a	23,5 A a	23,8 A a	23,1 A a	21,6 A a	22,4 A a	22,4 A a	22,6 A a
60-80	24,7 A a	26,0 A a	26,0 A a	26,7 A a	25,2 A a	25,1 A a	25,0 A a	26,1 A a
80-100	20,0 B a	20,0 B a	24,1 A a	23,9 A a	21,0 A a	22,0 A a	23,5 A a	24,8 A a
0-100	159,9Bb	168,2Ba	181,3Aa	183,1Ab	165,0Ba	169,4Ba	182,8Aa	186,6Aa
NT (Mg ha⁻¹)								
0-5	0,74 B b	0,86 B b	1,02 A a	1,18 A b	0,82 C a	0,96 B a	1,07 B a	1,34 A a
5-10	0,99 B a	1,05 ABa	1,16 A b	1,21 A b	1,03 B a	1,13 AB a	1,26 A a	1,34 A a
10-20	1,81 A a	1,91 A a	1,87 A a	1,80 A a	1,90 A a	1,88 A a	1,92 A a	1,95 A a
20-30	1,58 A a	1,47 A a	1,58 A a	1,67 A a	1,50 A a	1,54 A a	1,59 A a	1,63 A a
30-45	1,32 A a	1,45 A a	1,52 A a	1,56 A a	1,39 A a	1,59 A a	1,48 A a	1,56 A a
45-60	1,30 A a	1,28 A a	1,35 A a	1,31 A a	1,26 A a	1,28 A a	1,27 A a	1,38 A a
60-80	1,33 A a	1,38 A a	1,47 A a	1,42 A a	1,37 A a	1,33 A a	1,38 A a	1,48 A a
80-100	1,13 A a	1,22 A a	1,25 A a	1,27 A a	1,18 A a	1,19 A a	1,21 A a	1,42 A a
0-100	10,19Ca	10,62BCa	11,21ABa	11,43Aa	10,45Ca	10,91BCa	11,17ABa	12,09Aa

^a Letras maiúsculas na linha comparam sistemas de preparo no mesmo nível de adubação ($p < 0.10$, teste de Tukey).

^b Letras minúsculas na linha comparam níveis de adubação no mesmo sistema de preparo ($p < 0.10$, teste de Tukey).

TABELA 4. Taxas de sequestro de carbono orgânico total (COT) e acúmulo de nitrogênio total (NT) ao longo de 24 anos em Latossolo Vermelho sob preparo mínimo (PM), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD), em relação ao preparo convencional (PC), em níveis de adubação, reduzida ou normal (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Camada (cm)	Adubação reduzida			Adubação normal		
	PM	PDE	PD	PM	PDE	PD
Sequestro de COT (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)						
0-5	0,06 ^{ns}	0,15*	0,19*	0,00 ^{ns}	0,13*	0,25*
5-10	0,06 ^{ns}	0,13*	0,11*	0,03 ^{ns}	0,14*	0,16*
10-20	0,00 ^{ns}	0,08*	0,10*	0,06*	0,08*	0,08*
20-30	-0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,13*	0,11*
30-45	0,09 ^{ns}	0,14*	0,13*	0,02 ^{ns}	0,13*	0,06 ^{ns}
45-60	0,09*	0,10*	0,07*	0,03 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}
60-80	0,05 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}
80-100	0,00 ^{ns}	0,17*	0,16*	0,04 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Camada de sequestro de COT (cm) ^a						
	45-60	0-100	0-100	10-20	0-45	0-30
Sequestro total de COT (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹) ^b						
	0,09	0,77	0,76	0,06	0,61	0,60
Acúmulo de NT (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)						
0-5	5,0 ^{ns}	11,7*	18,3*	5,8 ^{ns}	10,4*	21,7*
5-10	2,5 ^{ns}	7,1*	9,2*	4,2 ^{ns}	9,6*	12,9*
10-20	4,2 ^{ns}	2,5 ^{ns}	-0,4 ^{ns}	-0,8 ^{ns}	0,8 ^{ns}	2,1 ^{ns}
20-30	-4,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	3,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}	3,8 ^{ns}	5,4 ^{ns}
30-45	5,4 ^{ns}	8,3 ^{ns}	10,0 ^{ns}	8,3 ^{ns}	3,8 ^{ns}	7,1 ^{ns}
45-60	-0,8 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,4 ^{ns}	5,0 ^{ns}
60-80	2,1 ^{ns}	5,8 ^{ns}	3,8 ^{ns}	-1,6 ^{ns}	0,4 ^{ns}	4,6 ^{ns}
80-100	3,8 ^{ns}	5,0 ^{ns}	5,8 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,3 ^{ns}	10,0 ^{ns}
Camada de acúmulo de NT (cm)						
	0	0-10	0-10	0	0-10	0-10
Acúmulo total de NT (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)						
	0	18,8	27,5	0	20,0	34,6

^{ns} não significativo; * diferença significativa de estoque pelo tratamento PC no mesmo nível de adubação ($P < 0.10$, teste de Tukey). ^a Na camada de sequestro/acúmulo foi contabilizado o limite superior da primeira camada onde houve taxa significativa até o limite inferior da última camada onde houve taxa significativa. ^b O sequestro/acúmulo total foi obtido pela soma dos valores significativos de cada camada da primeira até a última.

No solo com adubação reduzida, PD e PDE também incrementaram similarmente entre si o estoque de COT em relação ao solo em PC, mas em profundidade maior (até 100 cm) e em taxas maiores (0,76 e 0,77 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) que as observadas no solo adubado normalmente (Tabelas 3 e 4). Enquanto isso, o solo em PM continuou com um incremento fraco no estoque de COT (0,09 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹), restrito no caso da adubação reduzida à camada de 45-60 cm (Tabelas 4 e 5).

TABELA 5. Taxas de sequestro de carbono orgânico total (COT) e acúmulo de nitrogênio total (NT) ao longo de 20 anos em Latossolo Vermelho sob adubação normal em relação à adubação reduzida, em sistemas de preparo convencional (PC), preparo mínimo (PM), plantio direto escarificado (PDE) ou plantio direto (PD) (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Camada (cm)	PC	PM	PDE	PD
Sequestro de COT (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)				
0-5	0,09*	0,02 ^{ns}	0,06*	0,15*
5-10	0,06*	0,02 ^{ns}	0,07*	0,12*
10-20	0,02 ^{ns}	0,08*	0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
20-30	-0,08 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
30-45	0,09 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,00 ^{ns}
45-60	0,01 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
60-80	0,03 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
80-100	0,05 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Camada de sequestro de COT (cm) ^a				
	0-10	10-20	0-10	0-10
Sequestro total de COT (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹) ^b				
	0,15	0,08	0,13	0,27
Acúmulo de NT (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)				
0-5	4,0*	5,0*	2,5 ^{ns}	8,0*
5-10	2,0 ^{ns}	4,0 ^{ns}	5,0*	6,5*
10-20	4,5 ^{ns}	-1,5 ^{ns}	2,5 ^{ns}	7,5 ^{ns}
20-30	-4,0 ^{ns}	3,5 ^{ns}	0,5 ^{ns}	-2,0 ^{ns}
30-45	3,5 ^{ns}	7,0 ^{ns}	-2,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}
45-60	-2,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	-4,0 ^{ns}	3,5 ^{ns}
60-80	2,0 ^{ns}	-2,5 ^{ns}	-4,5 ^{ns}	3,0 ^{ns}
80-100	2,5 ^{ns}	-1,5 ^{ns}	-2,0 ^{ns}	7,5 ^{ns}
Camada de acúmulo de NT (cm)				
	0-5	0-5	5-10	0-10
Acúmulo total de NT (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)				
	4,0	5,0	5,0	14,5

^{ns} não significativo; * diferença significativa de estoque entre mesmos sistemas de preparo do solo ($P < 0.10$, teste de Tukey). ^a Na camada de sequestro/acúmulo foi contabilizado o limite superior da primeira camada onde houve taxa significativa até o limite inferior da última camada onde houve taxa significativa. ^b O sequestro/acúmulo total foi obtido pela soma dos valores significativos de cada camada da primeira até a última.

Quanto ao nitrogênio total, sua concentração (Tabela 2) e estoque (Tabela 3) aumentaram com a adoção do PD ou PDE em substituição ao PC; mas estes aumentos ocorreram somente até 10 cm de profundidade, tanto na adubação normal quanto na reduzida, mostrando serem mais superficiais no perfil do solo que os aumentos de COT. Também

diferente do observado para o acúmulo de COT, cujas taxas foram muito parecidas no solo escarificado ou não, o acúmulo de nitrogênio foi maior no PD (27,5-24,6 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) que no PDE (18,8-20,0 kg N ha⁻¹ ano⁻¹). Quanto ao PM, este não incrementou o estoque de nitrogênio em relação ao PC (Tabelas 4 e 5), mostrando que em se tratando deste elemento os dois sistemas de preparo são muito similares.

A única variável qualitativa da matéria orgânica avaliada no estudo foi a relação C/N, e esta não foi alterada nem por sistema de preparo nem por nível de adubação (Tabela 2). No entanto, houve clara tendência de aumento da relação C/N desde a camada de 0-5 cm (média de 12,8) até 80-10 cm (média de 18,4).

1.3.3. Efeito da adubação

O solo em adubação normal teve aumento na concentração (Tabela 2) e o estoque de COT (Tabela 3) em relação ao solo em adubação reduzida somente até 10 cm de profundidade. As taxas de sequestro de COT variaram de 0,13-0,15 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, no solo em PC e PDE, até 0,27 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no solo em PD (Tabela 5). No solo em PM, o incremento de COT foi ligeiramente mais profundo no perfil, mas restrito a 10-20 cm, numa taxa de 0,08 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

A adubação normal também aumentou a concentração (Tabela 2) e o estoque de nitrogênio total no solo (Tabela 3), mas restritamente a 0-5 cm no PC e PM e a 5-10 cm no PDE, em taxas de 4,0 a 5,0 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 5). Taxa quase três vezes maior de acúmulo de nitrogênio ocorreu no solo em PD (14,5 kg NT ha⁻¹ ano⁻¹), e na camada de 0-10 cm.

1.4. DISCUSSÃO

No solo em PD com adubação normal houve sequestro de 0,60 Mg COT ha⁻¹ ano⁻¹ até 30 cm de profundidade (Tabela 4). Esse resultado está diretamente relacionado à proteção física ou agregação, pois não há revolvimento do solo, que diminui taxas de mineralização da MOS pelo menor contato do resíduo com o solo, e também pela redução no tráfego de máquinas e implementos agrícolas que causam desestruturação do solo por sucessivas operações de preparo (Six et al., 2002a; Chung et al., 2008). A proteção física atua como uma barreira à ação dos decompositores da MOS, constituindo-se o principal mecanismo de estabilização de COT em condições de clima subtropical e tropical (Bayer et al., 2000; Six et al., 2002b; Six et al., 2004a; Diekow et al., 2005; Conceição et al., 2008; Salton et al., 2008;

Piva et al., 2012). Em trabalhos recentes no Sul do Brasil, o acúmulo de COT no solo em PD em experimentos de longa duração foi amplamente discutido (Ferreira et al., 2013; Sá et al., 2013; Sá et al., 2014 e Albuquerque et al., 2015). West e Post (2002) estimaram uma taxa de sequestro no solo de $0,48 \pm 0,13 \text{ Mg C ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 276 comparações envolvendo o sistema PD comparado ao PC em várias localidades do mundo e sugerem incrementos de $0,20 \pm 0,12 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ quando associados à rotação de culturas com espécies leguminosas. As taxa de sequestro de COT no solo em PD encontradas nesse experimento corroboram com resultados de trabalhos realizados na região Sul do Brasil. Amado et al. (2006) encontraram taxa de sequestro entre $0,12$ e $0,59 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$; Bayer et al. (2006), entre $0,11$ e $0,68 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$; e Piva et al. (2012), uma taxa de $0,76 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$.

Em adubação normal, a taxa de sequestro de COT no solo sob PD ($0,60 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) ocorreu em 0-30 cm, a partir dessa camada não teve mais acúmulo de COT (Tabela 4). Maior acúmulo de COT em PD somente até 30 cm corrobora com o resultado obtido no Canadá por Poirier et al (2009), num experimento de sistemas de preparo de solo com 14 anos, onde a aplicação de N em quantidades equivalentes não teve efeito no acúmulo de COT em 0-60 cm, por diferenças que ocorreram na camada de 20-30 cm.

O acúmulo de COT até 30 cm no solo em PD difere um pouco da idéia de acúmulos em profundidades maiores (Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2005; Baker et al., 2007; Boddey et al., 2010; Albuquerque et al., 2015), mas nesse experimento, exceto a soja, não teve mais plantas leguminosas que teriam esse papel de acumular C em maiores profundidades pelo maior aporte de N no sistema que supostamente aumentaria a produtividade das culturas e quantidade de resíduos (incluindo raízes) que retornariam ao solo, favorecendo maior acúmulo de COT (Campbell e Zentner, 1993). West e Post (2002) sugerem incrementos no sequestro de C de $0,20 \pm 0,12 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ no PD associado com leguminosas. No trabalho de Boddey et al. (2010), por exemplo, foi encontrado acréscimo de 59 % no sequestro de C a uma taxa de $1,53 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 0-100 cm em experimentos com PD com 15 e 26 anos utilizando leguminosas na região Sul do Brasil. Diekow et al. (2005) encontraram taxas de sequestro de $1,01$ e $1,42 \text{ Mg C ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em Argissolo não adubado e adubado com N, respectivamente, em 0-107,5 cm, após 17 anos sob PD, e Albuquerque et al. (2015) taxa de $0,50 \text{ Mg C ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em 0-100 cm, num Latossolo após 21 anos.

Em adubação normal, o solo em PDE sequestrou COT até 45 cm, a uma taxa de $0,61 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (Tabela 4). Essa taxa foi similar a do solo em PD ($0,60 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e indica que a escarificação eventual do solo para resolver estritamente problemas de compactação

pode ser empregada sem prejuízo ao estoque de COT. Uma revisão de Conant et al (2007) descreve que a escarificação no PD pode ocasionar perdas de COT nas camadas superficiais, contudo menores se comparado ao PC, em experimentos de longa duração. Esses autores sugerem redução de 20 % no potencial de sequestro de C no PD escarificado a cada dois anos, contudo nesse presente estudo a escarificação do solo a cada três anos não afetou o potencial de sequestro de COT (Tabela 4).

Com relação ao solo em PM, esse praticamente não acumulou COT nem NT no solo nos níveis de adubação normal e reduzida, sendo similar ao solo em PC (Tabela 4).

Na adubação reduzida, tanto o solo em PD ($0,76 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) como PDE ($0,77 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) sequestraram COT até 1 metro de profundidade e com taxas similares. Essas taxas foram levemente maiores se comparada ao da adubação normal, com $0,60$ e $0,61 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ para PD e PDE, respectivamente (Tabela 4). O maior efeito do PD e PDE no acúmulo de COT em adubação reduzida pode estar relacionado à supressão de P ao longo de 20 anos. Pierri (2014) encontraram que a diferença entre os níveis normal e reduzido de adubação foi $46,3 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, estudos mostram o efeito da adubação fosfatada no crescimento das raízes, demonstrando que em situação de diminuição da concentração de P no solo as raízes continuam se desenvolvendo (Rosolem e Marcello, 1998; Bhadoria et al., 2004). Como a forma de absorção do P pelas raízes é por rota simplástica, em caso de deficiência esse nutriente absorvido fica retido nas células, assim a raiz passa a atuar como dreno de P e, portanto, sustentando seu maior desenvolvimento em detrimento da parte aérea, podendo favorecer o acúmulo de COT em profundidade. Concomitantemente, Lopez-Búcio et al (2003) ao estudarem o desenvolvimento radicular de *Arabidopsis thaliana*, espécie testemunha, reportaram aumento de até cinco vezes na ramificação de raízes de plantas submetidas ao stress nutricional em relação às plantas supridas com P. Num Cambissolo subtropical, Mazza et al (2012) ao analisarem a razão entre a parte aérea e o sistema radicular de plantas de azevém reportaram maior investimento no crescimento das raízes em situações de deficiência de P em detrimento do acúmulo de massa seca na parte aérea.

Conforme a Tabela 5, a adubação normal teve efeito no sequestro de COT no solo em 0-10 cm, em relação à adubação reduzida, nos sistemas PD ($0,27 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), PDE ($0,13 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e no PC ($0,15 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$). Isso pode estar relacionado ao fornecimento, principalmente de N, além de P e K, nas adubações de semeadura que estimularam uma maior produção de biomassa das plantas que retornaram ao solo após vinte anos. Trabalhos sugerem que a maior variação no acúmulo de COT em camadas superficiais do solo pode ser obtida

por diferenças na adição de N via fertilizante ao sistema (Bayer et al., 2000; Vanderbygaart et al., 2003; Lovato et al., 2004; Diekow et al., 2005; Zanatta et al., 2007; Nunes et al., 2011). No PM, o maior acúmulo de COT na camada arável (em 10-20 cm) pode estar relacionado ao revolvimento do solo pela deposição de resíduos, esse resultado é suportado por Angers et al (1997) e Hermle et al (2008).

Além de sequestrarem COT, solo em PD e PDE acumularam 27,5 e 18,8 kg ha⁻¹ano⁻¹ de NT, respectivamente, em adubação reduzida, e 34,6 e 20,0 kg N ha⁻¹ano⁻¹ em adubação normal, respectivamente, até 10 cm de profundidade (Tabela 4). Nesses sistemas, o não revolvimento do solo pode ter favorecido o acúmulo de NT pela redução de taxas de mineralização (Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001; Amado et al., 2006). O acúmulo de NT até 10 cm, diferente do acúmulo de COT que ocorreu em camadas mais profundas, pode estar relacionado a uma menor relação C/N de resíduos de raízes localizadas na camada superficial do solo e sugere que o N está sendo aportado preferencialmente nas camadas superiores. No PD, o uso de leguminosas pode aumentar o acúmulo de NT no solo pelo aporte de NT via fixação biológica (Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2005), a soja pode ter contribuído nesse, entretanto, rotação de cultura apenas com essa leguminosa pode não promover acúmulo de NT no sistema, devido à elevada taxa de exportação de NT nos grãos o balanço final tende à zero (Alves et al., 2002).

O acúmulo de NT no PD e PDE foi coerente ao obtido por Diekow et al (2005), em 0-17,5 cm, apenas na rotação aveia + milho, com taxas entre 7,1 e 20,0 kg N ha⁻¹ano⁻¹, sem e com aplicação de N, respectivamente, mas inferiores na rotação com leguminosas, com lablab + milho com taxas de 80,0 e 104,7 kg N ha⁻¹ano⁻¹ e com ervilhaca + milho, com taxas de 70,6 e 101,8 kg N ha⁻¹ano⁻¹, num Argissolo subtropical sem e com aplicação de N, respectivamente, após 17 anos em PD tendo como referência um solo descoberto. Albuquerque et al., (2015), encontraram taxas entre 10 ± 60 kg N ha⁻¹ano⁻¹ em Latossolo sob PD e sistemas de culturas prevalecendo maiores acúmulos na presença de leguminosas.

O acúmulo de NT no PD superou o do PDE nos níveis de adubação normal e reduzida (Tabela 4). Como o NT está sendo acumulado preferencialmente na superfície, a mobilização do solo por escarificação de três em três anos pode ter favorecido o menor acúmulo no PDE em função de perdas por mineralização dos resíduos e da MOS.

Conforme a Tabela 5, a adubação normal teve efeito no acúmulo de NT em 0-10 cm, em relação à adubação reduzida, nos sistemas PD (14,5 kg ha⁻¹ano⁻¹), em 0-5 cm no PDE (5,0 kg ha⁻¹ano⁻¹), e em 0-5 cm, no PM (5,0 kg ha⁻¹ano⁻¹) e PC (4,0 kg ha⁻¹ano⁻¹), nesse caso o

acúmulo de NT nesses sistemas com adubação normal pode estar relacionado ao maior aporte de N via adubação de semeadura ao longo de 20 anos.

1.5. CONCLUSÕES

Plantio direto é uma alternativa eficiente no acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, em relação ao preparo convencional pelo não revolvimento, favorável à proteção física e menor mineralização, e promissor na manutenção do estoque de matéria orgânica do solo e no controle do aquecimento global pela mitigação de gás de efeito estufa;

Plantio direto com escarificação foi similar ao plantio direto contínuo, sem prejuízos no acúmulo de carbono e nitrogênio no solo. Isso abre a possibilidade de eventual mobilização do solo para resolver estritamente problemas de compactação superficial;

Adubação normal aumenta o potencial de acúmulo de carbono e nitrogênio no solo preferencialmente nas camadas superficiais possivelmente pelo maior desenvolvimento da parte aérea das plantas.

1.6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao professor Volnei Pauletti e ao Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (GENP) da Universidade Federal do Paraná pelos auxílios prestados durante as coletas de solo.

1.7. LITERATURA CITADA

- ALBURQUERQUE, M. A., DIECKOW, J., SORDI, A., PIVA, J. T., BAYER, C., MOLIN, R., PERGHER, M., RIBEIRO-JUNIOR, P. J. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. *Soil Use Manag.*, 31:1–9, 2015.
- ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R. M. e URQUIAGA, S. Soybean benefit to a subsequent wheat cropping system under zero tillage. In: *Nuclear techniques in integrated plant nutrient, water and soil management*. Vienna, IAEA, p.87-93, 2002.
- AMADO, T. J. C., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P. C., SPAGNOLLO, E., CAMPOS, B. H. C. e VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1599–1607, 2006.

- ANGERS, D. A.; M. A. BOLINDER, M. R.; CARTER, E. G.; GREGORICH, C. F.; DRURY, B. C.; LIANG, R. P.; VORONEY, R. R.; SIMARD, R. G.; DONALD, R. P.; BEYAERT, e MARTEL, J. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Tillage Res.* 41:191–201, 1997.
- BAKER, J. M., OCHSNER, T. E., VENTEREA, R. T. e GRIFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration – What do we really know? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 118, 1 –5, 2007.
- BAYER, C., MARTIN-NETO, L., MIELNICZUK, J., PAVINATO, A. e DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, 86, 237–245, 2006.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L. e FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54:101-109, 2000.
- BHADORIA, P. S.; EL DESSOUGI, H.; LIEBERSBACH, H. Phosphorus uptake kinetics, size of root system and growth of maize and groundnut in solution culture. *Plant and Soil*, v.262, p.327-336, 2004.
- BLAKE, G. R. e HARTGE, K. H. Bulk density. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Minerological Methods.* (ed. A. Klute), pp. 363–382. SSSA, Madison, 1986.
- BODDEY, R.M.; CLAUDIA P. JANTALIA, C.P.; CONCEICÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J. SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R. e URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biol.*, 16:784–795, 2010.
- CAMPBELL, C.A. e ZENTNER, R. P. Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1034–1040, 1993.
- CONANT, R. T., EASTER, M., PAUSTIAN, K., SWAN, A., WILLIAMS, S. Impacts of periodic

- tillage on soil C stocks: A synthesis. *Soil Tillage Res.*,95:1–10, 2007.
- CHUNG, H.; GROVE, J.H. e SIX, J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. *Soil Science Society of American Journal*, 72:1132-1139, 2008.
- CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C. e MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio em estudos de proteção física da matéria orgânica do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:541-549, 2008.
- DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. e KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil and Tillage Research*, 81:87-95, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (BRASIL). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Brasília - DF, 353p., 2013.
- EMBRAPA/FUNDAÇÃO ABC. Levantamento semidetalhado de solos – Município de Castro. Relatório Interno. Castro-PR: EMBRAPA/SOLOS, EMBRAPA/FLORESTAS, FUNDAÇÃO ABC, 86p., 2001.
- FEBRAPDP 2012. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Disponível em: www.febrapdp.org.br.
- FERREIRA, A. O.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; SÁ, J.C.M.; FIORIN, J. E.; HANSEL, D. S. S.; MENEFEE, D. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research* 133: 65–74, 2013.
- GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; MCKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 70, n. 3, p. 975-985, 2006.

- HERMLE, S., ANKEN, T.; LEIFELD, J. e WEISSKOPF, P. The effect of tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil Tillage Res.* 98:94–105, 2008.
- JANSEN, H. H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biol. Biochem.*, 38:419-424, 2006.
- LAL, R. Carbon emission from farm operations. *Enviroments International* 30:981-990, 2004.
- LOPEZ-BÚCIO, J.; CRUZ-RAMÍREZ, A. e AND HERRERA-ESTRELLA, L. Effects of nutrient availability on root architecture. *Current Opinion in Plant Biology*, 6:280–287, 2003.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. e VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:175–187, 2004.
- MAJUMDER, B. e KUZYAKOV, Y. Effect of fertilization on decomposition of ¹⁴C labeled plant residues and their incorporation into soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 109, n. 2, p. 94-102, 2010.
- MAZZA, L. M.;, MOTTA, A. C. V.; MORAES, M.; VEZZANI, F. M.; ADAMI, P. F. e RABEL, D. O. Forage yield and quality on soil subjected to phosphorus rates in subtropical grassland of Brazil. *R. Bras. Zootec.*, v.41, n.5, p.1100-1109, 2012.
- NUNES, R. S.; LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G. e MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1407-1419, 2011.
- PIERRI, L. Energia da biomassa residual de aveia branca e soja em resposta ao sistema de preparo do solo e níveis de adubação. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, 2014. 65p. (Dissertação - Mestrado).

- PIVA, J. T.; DIECKOW, D.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, T. e PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. *Plant Soil*, 361:359–373, 2012.
- POIRIER, V.; ANGERS, D. A.; ROCHETTE, P.; CHANTIGNY, M. H.; ZIADI, N.; TREMBLAY, G. e FORTIN, J. Interactive Effects of Tillage and Mineral Fertilization on Soil Carbon Profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:255-261, 2008.
- ROSOLEM, C. A. e MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. *Revista Scientia Agricola*, v.55, n.3, p.448-455, 1998.
- SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENSKE, S. P.; PICCOLO, M. C. e FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of American Journal*, 65:1486-1499, 2001.
- SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L., TIVET, F., LAL, R., BOUZINAC, S., BORSZOWSKI, P. R., BRIEDIS, C., SANTOS, J. B. D., SÁ, M. F. M., BERTOLONI, C., HARTMAN, D. D. C. e ROSA, J. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of sub-tropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. *Land Degradation and Development*, 2013.
- SÁ, J. C. M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z.; e SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research* 136: 38-50, 2014.
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M. e BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:11-21, 2008.

- SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). SAS/STAT user's guide: version 8. Cary, 1999. 1243p.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F. e COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 10:842- 847, 2006.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. e BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. Soil Tillage Res., 76:39-58, 2004.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S. e DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil Tillage Research, 79:7-31, 2004.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SÁ, J. C. A. e ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. Agronomy, 22:755-775, 2002.
- TISDALL, J. M. e OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 33:141-163, 1982.
- VANDENBYGAART, A. J.; GREGORICH, E. G. e ANGERS, D. A. Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies. Canadian Journal of Soil Science. 83:363-380, 2003.
- WEST, O. T. e POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:1930-1946, 2002.
- ZANATTA JA, BAYER C, DIECKOW J, VIEIRA FCB, MIELNICZUK J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. Soil Tillage Research 94(2):510–519, 2007.

ZOTARELLI, L., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S., BODDEY, R. M., SIX, J. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. *Soil Tillage Res.* 95:196–206, 2007.

CAPÍTULO 2. EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO EM LATOSSOLO E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

Autor: Reinaldo Carlos Brevilieri

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

RESUMO

Sistemas conservacionistas de preparo como plantio direto (PD) pode mitigar emissões de gases de efeito estufa (GEE) em relação ao sistema convencional através do não revolvimento do solo. O objetivo do estudo foi avaliar o potencial de mitigação de GEE pela determinação do potencial de aquecimento global (PAG) de sistemas de preparo em Latossolo, num experimento implantado em 1989, em Ponta Grossa - PR. Os sistemas de preparo avaliados foram: plantio direto (PD), plantio direto escarificado a cada três anos (PDE), e preparo convencional com aração e gradagem duas vezes ao ano (PC). O sistema de culturas do experimento inclui soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e milho (*Zea mays* L.), no verão; trigo (*Triticum aestivum* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) essa para cobertura, e branca (*Avena sativa* L.) para grãos, no inverno. Amostras de ar foram coletadas de 25/05/2013 à 07/09/2015, incluindo três safras de inverno e duas de verão, numa sequência de trigo, soja, aveia preta, milho e aveia branca. O PAG de cada sistema, em kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado com base no sequestro de C no solo sendo o PC considerado como linha de base, as emissões de N₂O e CH₄ e os custos totais envolvendo as operações e insumos. Os resultados foram submetidos à análise de variância e correlação e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey (p<0,10). Picos de emissão de N₂O ocorreram de 7 a 20 dias após eventos de preparos e mobilização do solo, e adubações nitrogenadas, possivelmente pelo aporte de N para nitrificação e ou desnitrificação, e na senescência da soja, provavelmente pela mineralização do N de nódulos radiculares e eventualmente de folhas caídas. O PC teve maiores picos, o preparo do solo favoreceu à mineralização do resíduo podendo ter incrementado as taxas de nitrificação e ou desnitrificação pela maior atividade microbiana. Como resultado final, a emissão acumulada média de N₂O no inverno, em kg de N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, foi maior no PC (4,2) e menor no PD (2,6) e PDE (2,9). Essa mesma tendência foi observada no verão, a emissão cumulativa média de N₂O, em kg de N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, foi maior no PC (5,0) e menor no PD (3,6), não diferindo do PDE (3,8). Para CH₄, influxos

normais decorrentes do consumo de CH_4 (metanotrofia) foram observados na maior parte do período, embora efluxos ocorressem após adubações nitrogenadas, principalmente, e preparos de solo. O consumo acumulado médio de CH_4 no inverno, em $\text{kg de C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, foi maior no PD (4,0) e PDE (3,4), possivelmente pela melhor condição estrutural do solo que estimulou a metanotrofia, e menor no PC (1,60). No verão houve mesma tendência, o consumo acumulado médio de CH_4 , em $\text{kg de C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, foi maior no PD (3,0) que não diferiu do PDE (2,5), mas menor no PC (2,1). Os sistemas agiram como fonte de GEE, pois apresentaram PAG positivo, contudo o sistema PD ($571,4 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) apresentou menor PAG, seguido PDE ($662,2 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), reflexo da menor emissão de GEE e do menor custo em relação ao PC ($1648,1 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Resultados indicam que sistemas conservacionistas de preparo do solo como PD ou PDE mesmo atuando como fonte de GEE para a atmosfera são estratégias promissoras na redução de GEE quando comparados ao PC, uma vez que promovem o sequestro de C e mitigam emissões de N_2O e CH_4 , além de apresentarem menores custos.

Palavras-chave: Sistemas conservacionistas de preparo do solo, mitigação de óxido nitroso e metano, potencial de aquecimento global.

CHAPTER 2. NITROUS OXIDE AND METHANE EMISSIONS IN OXISOL AND GLOBAL WARMING POTENTIAL IN TILLAGE SYSTEMS

Author: Reinaldo Carlos Brevilieri

Advisor: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

ABSTRACT

*Conservation systems as no-till (NT) can mitigate greenhouse gas (GHG) emissions compared to conventional system by not soil disturbance. The aim of the study was to assess the GHG mitigation potential for determining the global warming potential (GWP) of tillage systems in Oxisol, an experiment implemented in 1989 in Ponta Grossa - PR. The tillage systems evaluated were: no-till (NT), no-till with chiseling every three years (NTch), and conventional tillage with plowing and harrowing twice a year (PC). The experimental cultures system includes soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and maize (*Zea mays* L.), in summer; and wheat (*Triticum aestivum* L.) and black oat (*Avena strigosa* Schreb.), this to cover, and white oat (*Avena sativa* L.) to grain, in winter. Air samples were collected of 05/25/2013 to 09/07/2015, including three and two winter seasons summer, a sequence wheat, soybean, black oat, corn and white oat. The GWP for each system in $\text{kg C-CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ was calculated based on sequestering soil C and the CT considered as the baseline, N_2O and CH_4 emissions and the total costs involved operations and inputs. The results were submitted to analysis of variance and correlation and the treatment means were compared by Tukey test ($p < 0.10$). N_2O emission peaks occurred 7-20 days after disturbance events and nitrogen fertilization, possibly by the N supply to nitrification and or denitrification, and soybean senescence, probably by N mineralization of root nodules and possibly fallen leaves. The CT had higher peaks, the disturbance favored the mineralization of residue may have increased the nitrification rate and denitrification or by increased microbial activity. As a final result, the cumulative average N_2O emission in winter, in $\text{kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$, was higher in the CT (4.2) and lower in NT (2.6) did not differ from the NTch (2.9). This same trend was observed in the summer, the average cumulative N_2O emissions, in $\text{kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$, was higher in the CT (5.0) and lower in NT (3.6), not differing from the NTch (3.8). For CH_4 , normal inflows resulting from the consumption of CH_4 (methanotrophy) were observed in most of the period while efflux occurred after nitrogenous fertilizers, principally and soil disturbance. The average cumulative consumption of CH_4 in winter, in $\text{kg of C-CH}_4 \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$, was higher in NT*

(4.0) and NTch (3.4), possibly the best soil structural conditions that stimulated methanotrophy and less on the CT (1.60). In the summer there was the same trend, the average accumulated consumption of CH_4 , in kg of C- $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ was higher in NT (3.0) that did not differ from NTch (2.5), but lower in CT (2.1). The systems acted as a source of GHG, as presented positive PAG, yet the NT system ($571.4 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) showed a lower GWP, followed NTch ($662.2 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), reflecting the lower GHG emissions and lower cost compared to the CT ($1648.1 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Results indicate that conservation tillage systems as NT or NTch even acting source of greenhouse gas to the atmosphere are promising strategies in reducing greenhouse gas compared to the CT, since they promote the sequester C and mitigate N_2O and CH_4 , in addition having lower costs.

Keywords: conservation systems of tillage, mitigation of nitrous oxide and methane, global warming potential.

2.1. INTRODUÇÃO

O setor agropecuário, ao lado do setor de energia, é o que mais emite gases do efeito estufa (GEE) no Brasil, com 37 % das emissões nacionais em CO₂-equivalente. Nesse setor, os solos agrícolas brasileiros respondem por 35,9 % através de emissões diretas (animais em pastagem, fertilizantes sintéticos, aplicação de adubo, resíduos agrícolas e solos orgânicos), e indiretas (deposição atmosférica e lixiviação) (MCTI, 2014).

Solos agrícolas bem manejados, ao sequestrarem carbono (C), mitigam as emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Lal, 2004; Majumder e Kuzyakov, 2010). Sistemas de rotação de culturas com elevada adição de C associadas a sistemas conservacionistas de preparo do solo, como o plantio direto (PD), favorecem a remoção de CO₂ da atmosfera (Bayer et al., 2000; Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2005; Amado et al., 2006; Cerri et al., 2010), contudo apenas o sequestro de C não é uma forma definitiva de mitigação do aquecimento global por um sistema de uso e manejo. O N₂O e o CH₄, mesmo emitidos em quantidades relativamente menores que o CO₂, são 310 e 21 vezes, respectivamente, mais potentes que o CO₂ em forçamento radiativo (MCTI, 2014)..

Para o N₂O, autores relatam que o PD aumenta a emissão pelo favorecimento da desnitrificação, principal processo de formação de N₂O pela maior umidade e densidade do solo e menor porosidade de aeração (Mackenzie et al., 1997; Ball et al., 1999; Baggs et al., 2003; Escobar et al., 2010). Resultados com emissões similares entre PD e preparo convencional (PC) também foram encontrados na literatura, nas regiões Subtropical (Jantalia et al., 2008) e Tropical (Metay et al., 2007; Siqueira-Neto et al., 2011). Em contrapartida, estudos recentes mostram menor emissão de N₂O em PD comparado ao convencional (Passianoto et al., 2003; Malhi et al., 2006; Chatskikh e Olesen, 2007; Gregorich et al., 2008; Ussiri et al., 2009; Mutegi et al., 2010; Petersen et al., 2011; Piva et al., 2012) e as razões da menor emissão podem estar associadas ao não revolvimento do solo.

Com relação ao CH₄, sua emissão ou absorção pelo solo é regulada pelos processos microbiológicos de produção e de oxidação (Hutsch, 1998). Solos aerados são importantes sumidouros de CH₄, pois favorecem as bactérias metanotróficas, aeróbias, capazes de utilizar esse gás como fonte de C e energia. O preparo do solo pode interferir nessa comunidade pela perturbação física atribuída ao revolvimento, ou ainda modificar a estrutura do solo de modo a comprometer a difusão de CH₄.

Apenas o sequestro de C não é uma forma definitiva de mitigação do aquecimento global por um sistema de uso e manejo. Há necessidade de determinar o potencial de

aquecimento global (PAG), em kg C-CO₂eq ha⁻¹ano⁻¹, do sistema (Robertson et al., 2000; Six et al., 2004; Mosier et al., 2005). Com base no sequestro de C no solo, os custos de operação e insumo, e as emissões acumuladas de N₂O e CH₄.

Levando em consideração que a área agrícola nacional em PD responde por 32 milhões de hectares (Febrapdp, 2012), informações sobre a mitigação de N₂O e CH₄ no PD precisam ser geradas para subsidiar estratégias mitigadoras no setor agropecuário, o trabalho a seguir objetivou avaliar o potencial de mitigação de N₂O e CH₄ por sistemas conservacionistas de preparo em Latossolo da região Sul através do cálculo do PAG.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Área experimental

O estudo foi conduzido num experimento de campo implantado em 1989 situado na Fundação ABC para Pesquisa e Divulgação Técnica no município de Ponta Grossa (Brasil, 25°00'53"S e 50°09'07"O) sobre um Latossolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa e Fundação ABC, 2001), derivado de folhelhos e siltitos da formação Ponta Grossa. A textura do solo é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1. Distribuição granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Camada (cm)	Areia	Silte	Argila
	----- g kg ⁻¹ -----		
0-5	450 ± 37 ^a	110 ± 13	440 ± 37
5-10	438 ± 42	94 ± 19	468 ± 42
10-20	437 ± 41	125 ± 13	438 ± 29
20-30	459 ± 50	116 ± 8	425 ± 38
30-45	419 ± 38	122 ± 17	459 ± 37
45-60	418 ± 40	135 ± 22	448 ± 27
60-80	409 ± 32	156 ± 42	434 ± 70
80-100	386 ± 21	111 ± 7	503 ± 30

^a Desvio padrão

O clima é subtropical (Cfb, Köppen) e o relevo é suave ondulado. Em 1967 houve a conversão de campo nativo para agricultura, não havendo cultivo no inverno, mas arroz (*Oryza sativa* L.) no verão, por três anos consecutivos. Após esse período, a área teve trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão. Plantio direto foi

introduzido em 1981, com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para cobertura no inverno e soja no verão, por sete anos consecutivos. Uma correção do solo com 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 400 kg ha⁻¹ de termo fosfato magnésiano (18% de P₂O₅ e 7% de magnésio) ocorreu no inverno de 1988 e a implantação do experimento no ano seguinte, em 1989.

2.2.2. Sistemas de preparo do solo e adubação

O experimento foi constituído pela combinação de quatro sistemas de preparo do solo com dois níveis de adubação (reduzida e normal), num delineamento experimental de blocos completos ao acaso dispostos em faixas e três repetições. O sistema de culturas em rotação inclui soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e milho (*Zea mays* L.), no verão; e trigo (*Triticum aestivum* L.) e aveia para cobertura, preta (*Avena strigosa* Schreb.) ou branca (*Avena sativa* L.), no inverno.

Dos tratamentos experimentais, nesse estudo foram selecionados somente três sistemas de preparo do solo no nível normal de adubação:

- Preparo convencional (PC), com aração de discos a 20 cm de profundidade e duas gradagens de disco a 12 cm, antes de cada cultivo de inverno e de verão.
- Plantio direto escarificado (PDE), com dessecação por glifosato antes de cada semeadura, mas escarificação a 30 cm de profundidade a cada três anos antes da semeadura da cultura de inverno.
- Plantio direto (PD), com dessecação por glifosato antes de cada semeadura, sem preparo de solo.

Durante o período deste estudo, trigo recebeu 300 kg ha⁻¹ de 10-20-20 na semeadura e 200 kg ha⁻¹ de uréia em cobertura; soja recebeu 300 kg ha⁻¹ de 0-20-20 na semeadura e nada em cobertura; aveia preta não recebeu adubações na semeadura e nem em cobertura; milho recebeu 300 kg ha⁻¹ de 12-32-00 na semeadura e 320 kg ha⁻¹ de uréia + 150 kg ha⁻¹ de KCl em cobertura; e aveia branca 300 kg ha⁻¹ de 10-20-20 na semeadura e 110 kg ha⁻¹ de uréia em cobertura.

2.2.3. Emissões de N₂O e CH₄ do solo

O monitoramento de 835 dias das emissões teve início em 25/05/2013 e terminou em 07/09/2015, abrangendo 42 coletas de ar englobando três safras de inverno e duas safras de verão, numa sequência de trigo, soja, aveia preta, milho e aveia branca. O intervalo entre

coletas foi de 2 a 30 dias, sendo o menor, após preparo e escarificação do solo, semeadura, aplicação de fertilizante nitrogenado e na senescência da soja (Figura 1).

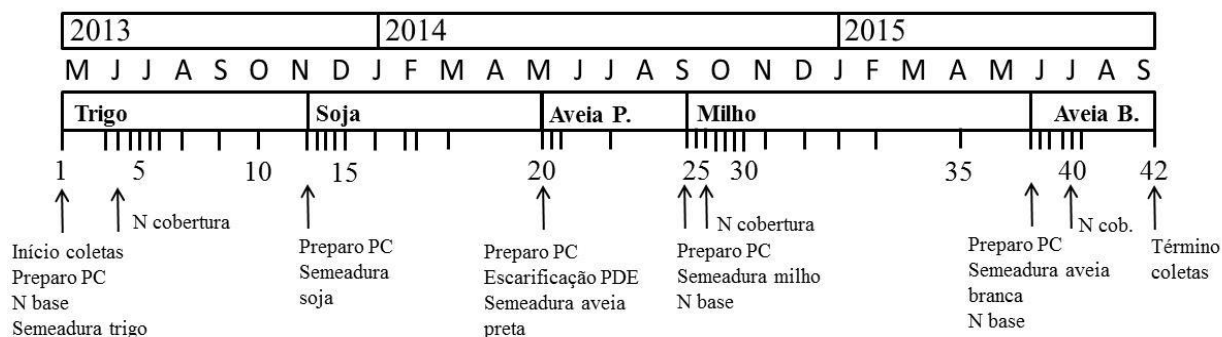


FIGURA 1. Distribuição temporal das 42 coletas de amostras de ar para avaliação da emissão de N_2O e CH_4 e dos demais eventos relevantes. (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

As amostras de ar foram coletadas em duplicatas por parcela, sempre entre 09:00 e 11:00 h, por representar a média diária de emissão de N_2O (Jantalia et al, 2008). O método de coleta foi câmara estática fechada (Mosier, 1989; Parkin et al., 2003; Zanatta et al., 2014), constituída de um cilindro (35 cm de altura x 33 cm de diâmetro) fechado na parte superior e assentado, no momento da coleta, sobre uma base de metal de mesmo diâmetro previamente ancorada no solo a 3,0 cm de profundidade. Uma borracha vedava o conjunto câmara-base. Amostras de ar foram coletadas com seringa de polipropileno de 10 mL acoplada numa válvula fixada no topo da câmara, aos 0, 15, 30 e 45 minutos após o fechamento da câmara-base. A coleta ocorreu de forma simultânea nas duplicatas. Um ventilador de 10 V foi acionado segundos antes para homogeneizar a massa interna de ar. As bases metálicas permaneceram no solo, exceto por ocasião de preparo do solo e semeadura, sendo reinstaladas logo em seguida. Não houve coleta de amostras de ar nas 24 horas após a reinstalação da base.

Após cada coleta, ainda no campo, as amostras de ar nas seringas foram transferidas para frascos de vidros de 12 mL (Exetainer, Labco), previamente evacuados. As amostras de ar foram enviadas ao Laboratório de Biogeoquímica do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre - RS) para determinação das concentrações de N_2O e CH_4 via cromatografia de fase gasosa em equipamento Shimadzu - GC 2014. O cromatógrafo é equipado com dois detectores: (i) ionização de chama (FID), para avaliação de CH_4 ; e (ii) captura de elétrons (ECD), para avaliação de N_2O .

A partir da concentração interna do gás, volume interno da câmara (31,05 L), temperatura interna da câmara (medida durante cada sessão de coleta com termômetro do tipo

espeto), pressão atmosférica (adotou-se 1 atm), e constante universal do gás ideal ($R=0,082057 \text{ L. atm. K}^{-1}. \text{ mol}^{-1}$), calculou-se o número de mols (n) e, a partir disso, a quantidade (em massa) do gás contido na câmara. Os fluxos de N_2O e CH_4 , em $\mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, corresponderam ao coeficiente angular da reta que descreve o incremento na quantidade de gás durante os 45 minutos de fechamento da câmara sobre a área da base metálica (Gomes et al., 2009; Zanatta et al., 2010; Zanatta et al., 2014; Wilson et al., 2015).

2.2.4. Atributos de solo

Uma mini parcela de 1,5 m x 1,5 m foi delimitada no entorno da base metálica de cada duplicata para avaliações de porosidade preenchida com água (PPA), teor de nitrogênio inorgânico (amônio e nitrato) e temperatura do solo, em 0-5 cm. Para a adubação em cobertura, o fertilizante foi aplicado manualmente nas mini parcelas e na área delimitada pela base metálica que foram previamente cobertas por lonas plásticas fixadas no solo, separadamente da aplicação mecanizada na parcela.

A PPA foi estimada com base na umidade gravimétrica e densidade do solo. Para determinação da umidade gravimétrica, amostras de solo foram coletadas com trado calador em cada evento de coleta de amostras de ar em três pontos na mini parcela e secas em estufa a 105 °C. A densidade do solo foi determinada em maio de 2013, entre a colheita de soja e semeadura de trigo, em dois pontos por parcela pelo método da escavação com espátula (Blake e Hartge, 1986), em área de 40 cm x 25 cm, delimitada por um gabarito de metal ancorado ao solo a 5,0 cm de profundidade.

Uma parte das amostras de solo coletadas a 0-5 cm na mini parcela em cada evento de coleta de amostras de ar foi usada para determinação da concentração de nitrogênio inorgânico (NH_4^+ e NO_3^-). Amostras, ainda com umidade do campo, foram acondicionadas em sacos plásticos e caixa de isopor e transportadas ao laboratório. Dez gramas de cada amostra foram submetidos à extração em KCl 2M, de preferência no mesmo dia da coleta e o extrato armazenado em refrigerador até a análise química. A determinação de NH_4^+ foi realizada por espectrofotometria de absorção ultravioleta com leitura em comprimento de onda de 640 nm, após o preparo das amostras com adição de fenol, nitroprussiato de sódio e uma solução oxidante (citrato de sódio e hipoclorito de sódio) com base na reação de Berthelot (Mulvaney, 1996). A determinação de NO_3^- também foi realizada no espectrofotômetro de absorção ultravioleta, sendo as amostras preparadas com solução de

H₂SO₄ 10% pelo método Griess-Ilosvay, tendo zinco como agente redutor e lidas em comprimento de onda de 210 nm (Heinzmann et al., 1984).

As concentrações de NH₄⁺ e NO₃⁻ foram integradas para determinação das intensidades de NH₄⁺ e NO₃⁻ no solo, sendo possível estimar a quantidade de NH₄⁺ e NO₃⁻ que permaneceu no solo ao longo do período de avaliação (Burton et al., 2008).

A temperatura do solo foi medida com termômetros digitais do tipo espeto (modelo MV 361 - Minipa), introduzidos a 5,0 cm de profundidade, em um ponto por mini parcela, simultaneamente à coleta das amostras de ar.

2.2.5. Custo de operações e insumos agrícolas e determinação do potencial de aquecimento global (PAG)

Para estimar os custos em C-CO₂-eq relativos ao consumo de diesel pelas operações agrícolas (semeadura, pulverizações e colheita) e pela produção, transporte e aplicação de insumos (nitrogênio, fósforo, potássio e calcário), demandados pelos sistemas de preparo, utilizaram-se informações de Lal (2004). Para estimar o C-CO₂-eq emitido pela produção de sementes, utilizaram-se informações de West e Marland (2002).

O potencial de aquecimento global foi calculado a partir da emissão anual acumulada de N₂O e CH₄, da diferença no estoque de carbono do solo nos sistemas PD e PDE em relação ao sistema utilizado como linha de base (PC), dividido pelo número de anos de implantação do experimento (24) e dos custos dos sistemas em C-eq.

Inicialmente as emissões de N₂O e CH₄ foram convertidas para C-eq, da seguinte maneira:

- N₂O

$$\text{N}_2\text{O (C-eq ha}^{-1}\text{ano}^{-1}) = [(\text{N}_2\text{O (kg N ha}^{-1}\text{ ano}^{-1})) \times \frac{44 \text{ (massa molar do N}_2\text{O)}}{28 \text{ (massa molar do N)}} \times 310 \times \frac{12 \text{ (massa molar do C)}}{44 \text{ (massa molar do CO}_2\text{)}}]$$

- CH₄

$$\text{CH}_4 \text{ (C-eq ha}^{-1}\text{ano}^{-1}) = [(\text{CH}_4 \text{ (kg C ha}^{-1}\text{ ano}^{-1})) \times \frac{16 \text{ (massa molar do CH}_4\text{)}}{12 \text{ (massa molar do C)}} \times 21 \times \frac{12 \text{ (massa molar do C)}}{44 \text{ (massa molar do CO}_2\text{)}}]$$

Em que: 310 e 21 é o potencial de aquecimento do N₂O e do CH₄, respectivamente, em relação ao CO₂ (MCTI, 2014). Após a conversão do N₂O e do CH₄ para C-eq, e com os valores dos custos e do sequestro de C calculou-se o PAG (em kg C-eq ha⁻¹ ano⁻¹) pela equação:

$$\text{PAG} = (\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}) + \text{Custos} - \text{Sequestro de C}$$

No intuito de verificar o potencial de mitigação dos sistemas calculou-se também um PAG relativo, em que se subtraiu o PAG obtido pelos sistemas PD e PDE pelo PAG obtido no sistema PC (linha de base).

2.2.6. Análise estatística

Os resultados de taxa de emissão, emissão acumulada e relações entre atributos do solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Médias entre tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). Análises de regressão e correlação também foram realizadas. Os gráficos foram construídos com o programa Sigmaplot 12 e as análises estatísticas foram realizadas com o programa SAS[®], versão 8.0 (SAS Institute Inc).

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Emissão de N₂O e CH₄

Os fluxos de N₂O permaneceram abaixo de 50 $\mu\text{g N m}^2 \text{ h}^{-1}$ na maior parte do período avaliado, sendo as maiores taxas encontradas no solo em PC, em relação ao PD e PDE. Picos de N₂O ocorreram em três situações, sendo após preparo de solo (convencional ou escarificação), semeadura e adubação nitrogenada de semeadura; após adubação nitrogenada em cobertura, principalmente; e na senescência da soja (Figura 2a).

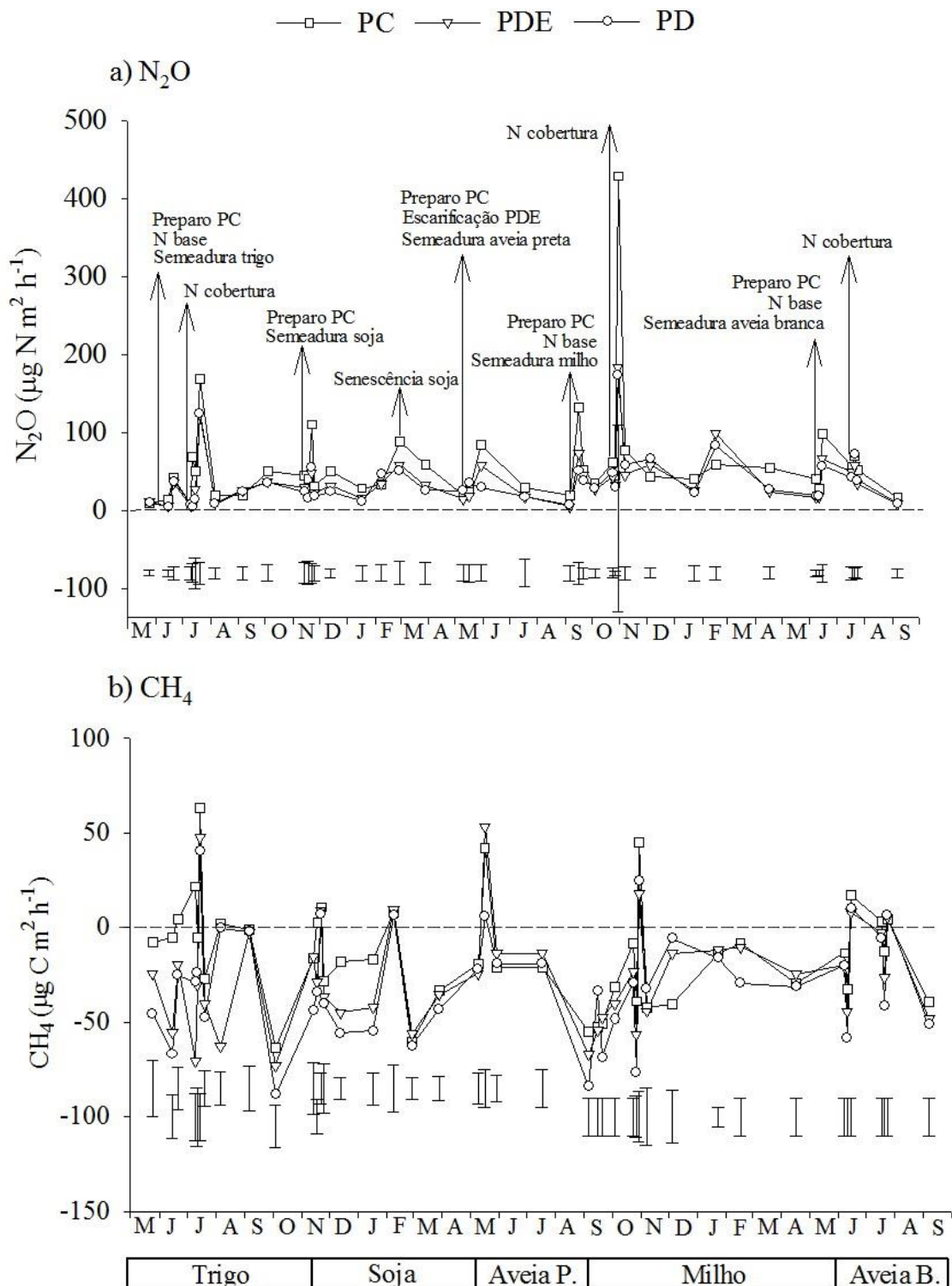


FIGURA 2. Fluxos de N_2O (a) e CH_4 (b) de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) ao longo de 2,5 ciclos agrícolas entre maio de 2013 e setembro de 2015. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($p < 10\%$). (Ponta Grossa, Paraná, $25^{\circ}00'53''\text{S}$ e $50^{\circ}09'07''\text{O}$).

No solo em PC, picos de N_2O ocorreram entre 7 e 20 dias após o revolvimento, e em PDE, 20 dias após escarificação. Nesse período, no cultivo de aveia preta foi registrada no solo em PC a uma taxa de $124 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e em PDE a uma taxa de $108 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$, mas em PD uma taxa de $50 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$, que pouco foi afetado pela semeadura e adubação nitrogenada de semeadura na emissão de N_2O (Figura 2a).

A adubação nitrogenada em cobertura teve efeito mais expressivo na emissão de N_2O , picos mais elevados no período avaliado ocorreram no dia 30 de outubro de 2014 no solo em PC ($428 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$), seguido do solo em PDE ($183 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$), que não diferiu do solo em PD ($174 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$), no 16º dia após aplicação de 320 kg ha^{-1} de uréia em cobertura no milho. No cultivo de trigo ocorreram picos de 169; 125 e $122 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ para o solo em PC, em PDE e PD, respectivamente, no 10º dia após aplicação de 200 kg ha^{-1} de uréia. A adubação em cobertura na aveia branca praticamente não afetou a emissão de N_2O (Figura 2a).

No final do mês de fevereiro ocorreram as mais elevadas taxas de emissões de N_2O no solo em PD ($92 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$), seguida do PC ($78 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$), e menor no PDE ($48,4 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$) na senescência da soja (Figura 2a).

A emissão cumulativa média anual de N_2O foi menor no solo em PD ($6,2 \text{ kg N ha}^{-1}$) e em PDE ($6,7 \text{ kg N ha}^{-1}$), mas superior no solo em PC ($9,1 \text{ kg N ha}^{-1}$). Essa mesma tendência foi observada no acúmulo médio de N_2O para as safras agrícolas. Entre as estações do ano, o acúmulo médio de N_2O no verão superou o do inverno (Tabela 2).

TABELA 2. Emissão acumulada N_2O e CH_4 de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015 (Ponta Grossa, Paraná, $25^\circ 00' 53'' \text{S}$ e $50^\circ 09' 07'' \text{O}$).

Sistemas de preparo	Trigo 2013	Soja 2013/14	Aveia P. 2014	Milho 2014/15	Aveia B. 2015	Média ¹		Média anual ²
						Inverno	Verão	
----- N_2O ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) -----								
PC	3,3 a	4,4 a	4,6 a	5,5 a	4,6 a	4,2 a B	5,0 a A	9,1 a
PDE	2,5 b	2,9 b	3,1 b	4,7 b	3,2 b	2,9 b B	3,8 b A	6,7 b
PD	2,4 b	2,7 b	2,3 b	4,6 b	3,1 b	2,6 b B	3,6 b A	6,2 b
----- CH_4 ($\text{kg C ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) -----								
PC	-0,5 a	-2,0 a	-3,8 a	-2,2 a	-0,6 a	-1,6 a A	-2,1 a A	-3,7 a
PDE	-3,3 b	-3,0 ab	-5,8 ab	-2,0 a	-1,1 b	-3,4 b B	-2,5 ab A	-5,9 b
PD	-3,5 b	-3,7 b	-7,2 b	-2,4 a	-1,2 b	-4,0 b B	-3,0 b A	-7,0 b

Letras minúsculas na coluna comparam sistemas de preparo e letras maiúsculas na linha comparam as estações inverno e verão. Teste de Tukey ($p < 0,10$). ¹ Inverno: trigo, aveia preta e aveia branca; verão: soja e milho. ² Soma das médias de inverno e verão.

Com relação ao CH_4 , influxos decorrentes da absorção no solo ocorreram na maior parte do tempo, e picos de emissão ocorreram após preparo de solo (convencional ou escarificação) e adubação nitrogenada (Figura 2b).

No solo em PC, efluxos de CH_4 foram encontrados entre 3 e 10 dias após o preparo, a maior taxa associada ao revolvimento foi $32 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$ e ocorreu 3 dias após o evento, no solo em PDE uma taxa de $53 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$ foi encontrada 3 dias após a escarificação do solo, no dia da semeadura de aveia preta. No solo em PC, PDE e PD, taxas de 17,2; 10,4 e $8,4 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$ ocorreram 10 dias após o preparo do solo, semeadura e adubação nitrogenada de semeadura (Figura 2b).

Adubação nitrogenada em cobertura teve maior efeito nas emissões de CH_4 no cultivo de trigo, no solo em PC ($63 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$), em PDE ($48 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$) e em PD ($41 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$), 5 dias após a aplicação de $200 \text{ kg de uréia ha}^{-1}$. No cultivo de milho, efluxos de CH_4 do solo em PC ($45 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$), em PD ($25 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$) e em PDE ($18 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$) ocorreram 8 dias após a aplicação de $320 \text{ Kg de uréia ha}^{-1}$. No cultivo de aveia branca, a aplicação de N em cobertura pouco afetou a emissão de CH_4 , embora efluxos ocorreram no solo em PC ($4 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$), PDE ($5 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$) e PD ($6 \mu\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$) (Figura 2b).

O consumo acumulado médio anual de CH_4 foi maior no solo em PD ($7,0 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), não diferindo do solo em PDE ($5,9 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), mas menor no solo em PC ($3,7 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Essa mesma tendência foi observada com relação ao consumo médio de CH_4 entre as safras. Entre as estações, o consumo médio de CH_4 não se diferiu entre as estações inverno e verão (Tabela 2).

2.3.2. Atributos de solo

A PPA apresentou mesmo comportamento entre sistemas de preparo ao longo do tempo, mas tendências de maiores valores ocorreram no solo em PD, intermediária em PDE, e menores em PC (Figura 3a). O maior valor de PPA registrado foi no solo em PDE (84,5%), observado no verão durante o cultivo de milho. O menor valor registrado foi no solo em PC (20,5%) durante o inverno no cultivo de aveia preta.

A temperatura do solo na camada de 0-5 cm de profundidade foi influenciada ao longo do período por sistemas de preparo, sendo que em PC ocorreram tendências de temperaturas mais elevadas, e em PD e PDE foram observadas tendências de temperaturas inferiores. A temperatura máxima registrada foi $29,3^\circ\text{C}$, ocorrida no verão, em fevereiro de 2014, no solo

PC. A temperatura mínima registrada foi no solo em PD (11,4 °C), no inverno, mês de julho de 2014 (Figura 3 b).

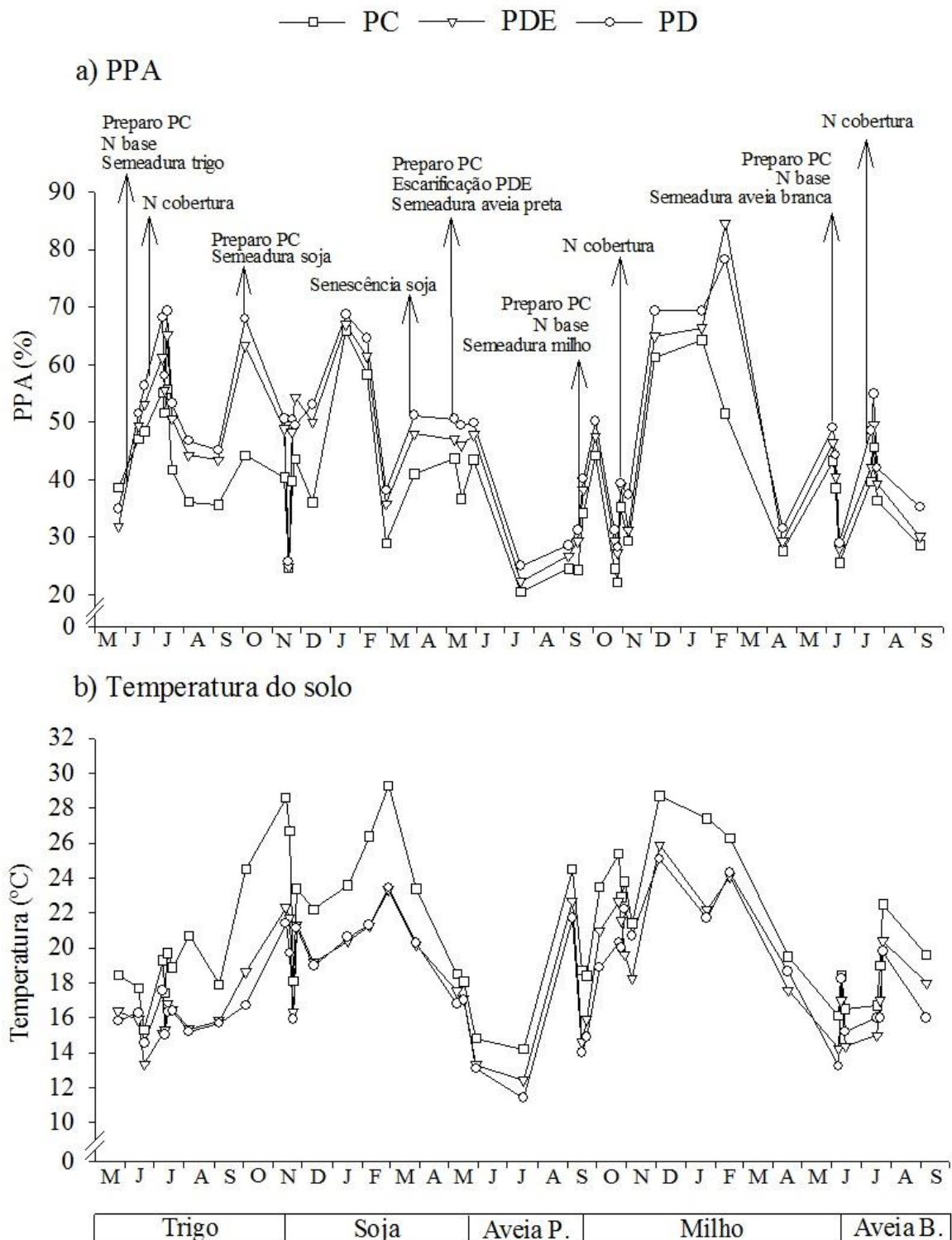


FIGURA 3. Porosidade preenchida com água (PPA) em porcentagem (a) e temperatura (b) em 0-5 cm de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

As variáveis PPA (%) e temperatura do solo não apresentaram relação com a emissão de N_2O a partir do solo em PC, PDE e PD durante o período avaliado, conforme a Figura 4.

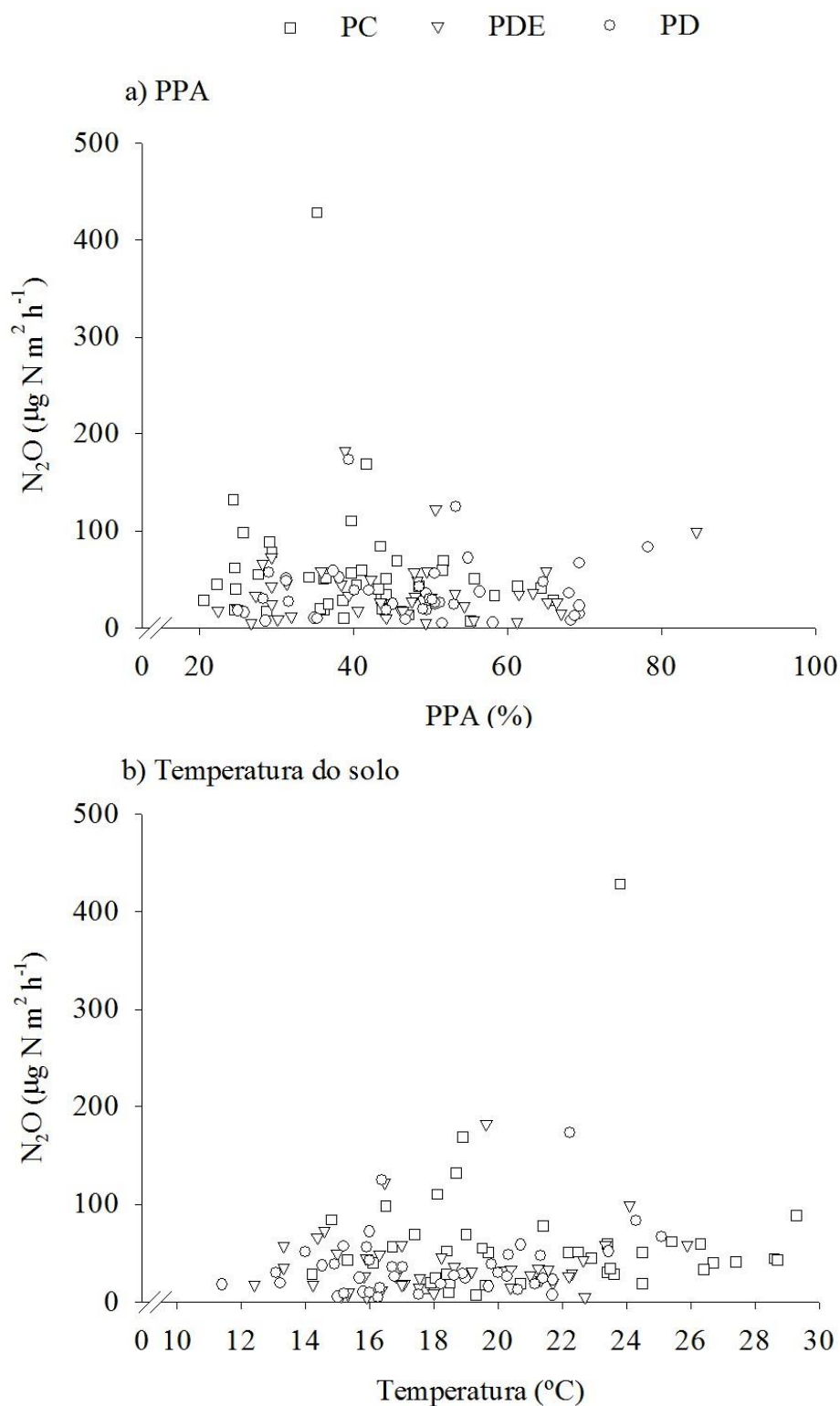


FIGURA 4. Relação entre emissão de N_2O com a porosidade preenchida com água – PPA (a) e temperatura do solo (b) em 0-5 cm de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

A concentração de NH_4^+ no solo apresentou mesma tendência entre sistemas de preparo, com valores abaixo de 20 mg kg^{-1} na maior parte do período avaliado, mas aumentando, entre 2 e 5 dias após aplicação de N na semeadura, e mais expressivamente entre 3 e 10 dias após aplicação de N em cobertura, diminuindo abruptamente com o passar dos dias. Maiores concentrações de NH_4^+ foram observadas durante cultivo de milho no PD ($146 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$), seguido do PDE ($134 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$) e PC ($128 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$), 10 dias após aplicação de 320 kg ha^{-1} de uréia em cobertura (Figura 5 a).

Para o NO_3^- , sua concentração no solo seguiu mesma tendência entre sistemas de preparo, mas comportamento praticamente diferente ao observado pelo NH_4^+ , ou seja, com baixos valores logo após adubações nitrogenadas e aumentos de concentração entre 10 e 20 dias, tornando a um decréscimo posteriormente. A diferença ocorreu também nos teores, pois o solo apresentou concentração de NO_3^- inferior em relação a concentração de NH_4^+ . O maior valor foi registrado no solo em PC ($68,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de N-NO_3^-), seguido do solo em PDE ($49,4 \text{ mg kg}^{-1}$ de N-NO_3^-) e menor no solo em PD ($41,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de N-NO_3^-), 14 dias após a aplicação de 320 kg ha^{-1} de uréia em cobertura no milho (Figura 5 b).

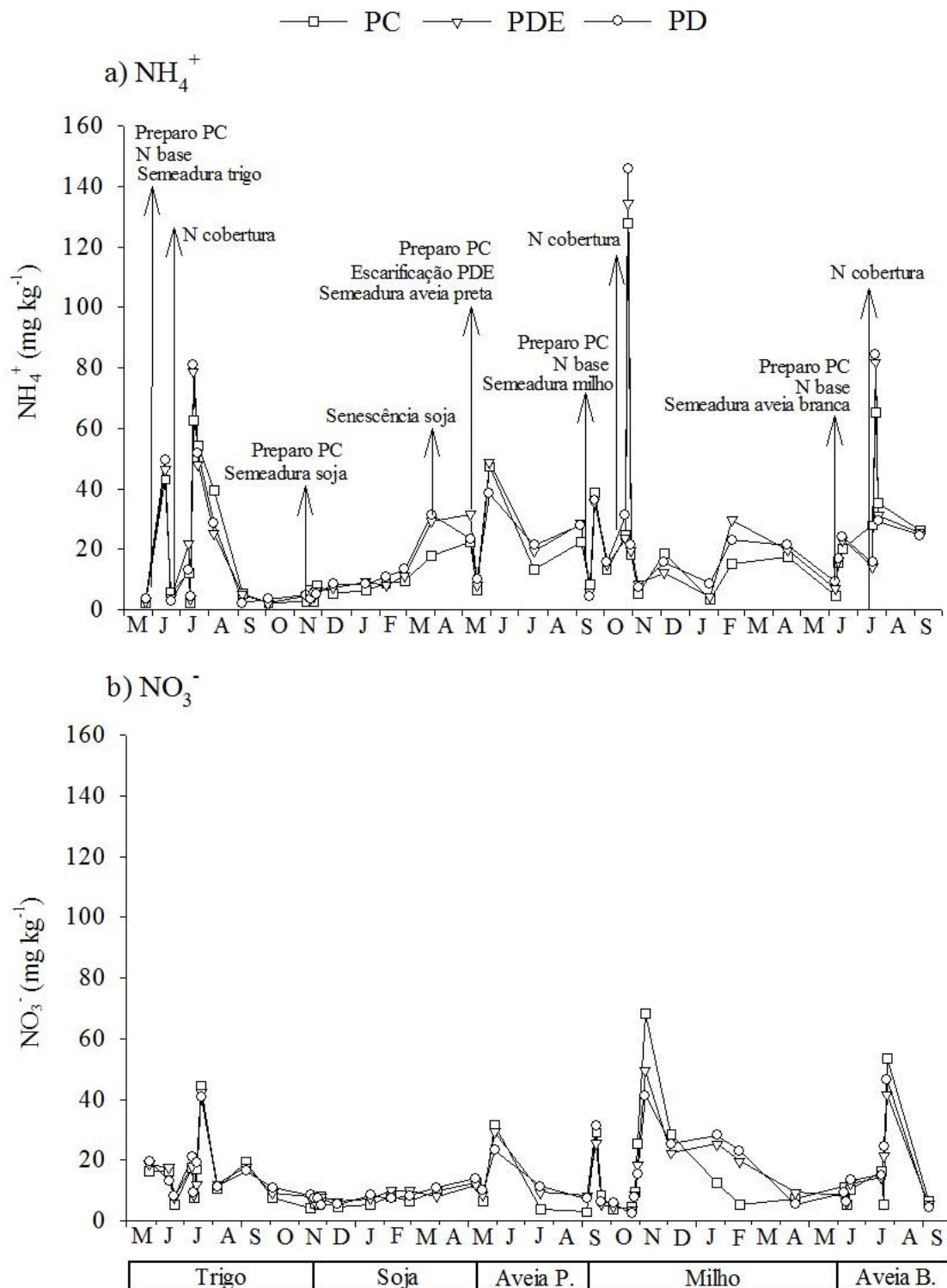


FIGURA 5. Concentração de NH_4^+ (a) e de NO_3^- (b) em 0-5 cm de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Em análise de correlação, não foram encontradas taxas significativas entre as concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo entre os sistemas de preparo com a emissão de N_2O durante o período avaliado (Figura 6).

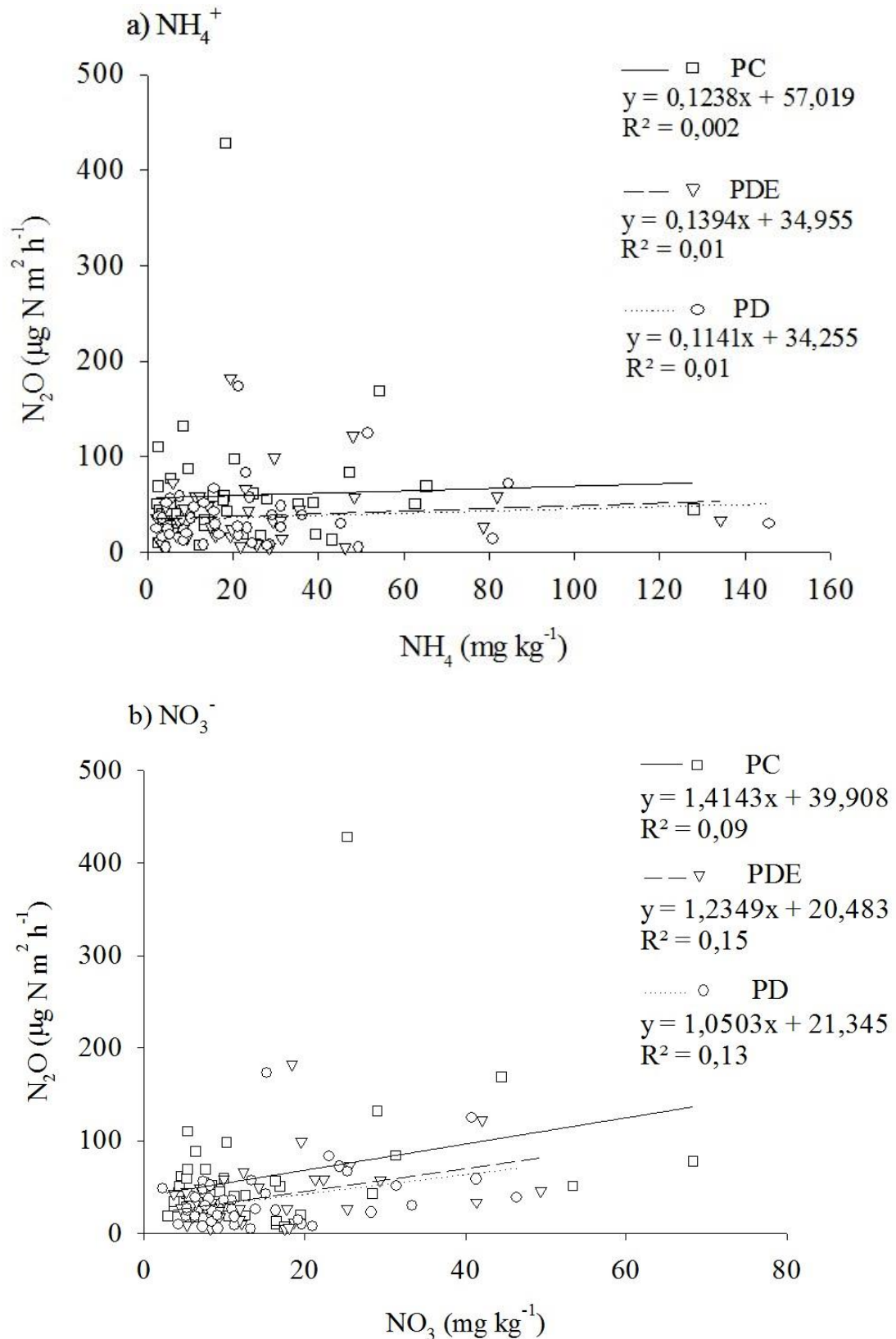


FIGURA 6. Relação entre fluxo de N_2O com o teor de NH_4^+ (a) e teor de NO_3^- (b) em 0-5 cm de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

A intensidade média anual de NH_4^+ , em g kg^{-1} dia, foi superior no solo em PD (5,3 g kg^{-1} dia), não diferindo do solo em PDE (5,1 g kg^{-1} dia), mas inferior no solo em PC (4,8 g kg^{-1} dia). A intensidade média de NH_4^+ no solo não se diferiu entre sistemas de preparo durante o inverno, mas foram superiores no solo em PD e em PDE, em relação ao solo em PC, no verão. Entre as estações, solo em PD e em PDE apresentou maior intensidade média de NH_4^+ no verão em relação ao inverno, e em PC não foram encontradas diferenças entre intensidades no verão e inverno (Tabela 3).

TABELA 3. Intensidades de NH_4^+ e de NO_3^- em 0-5 cm de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015 (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Sistemas de preparo	Trigo 2013	Soja 2013/14	Aveia P. 2014	Milho 2014/15	Aveia B. 2015	Média Inverno	Média Verão	Média anual*
----- NH_4^+ -----								
PC	2,8 a	1,1 b	1,9 a	3,6 b	2,6 a	2,4 a A	2,4 b A	4,8 b
PDE	2,6 a	1,4 ab	2,2 a	4,2 a	2,3 a	2,3 a B	2,8 a A	5,1 ab
PD	2,6 a	1,6 a	2,1 a	4,3 a	2,3 a	2,3 a B	2,9 a A	5,3 a
----- NO_3^- -----								
PC	2,2 a	0,9 a	1,2 a	3,8 b	2,0 a	1,8 a B	2,3 b A	4,1 a
PDE	2,2 a	1,1 a	1,3 a	4,3 a	1,7 a	1,7 a B	2,7 a A	4,4 a
PD	2,2 a	1,0 a	1,5 a	4,4 a	1,8 a	1,8 a B	2,7 a A	4,5 a

Letras minúsculas na coluna comparam sistemas de preparo e letras maiúsculas na linha comparam as estações inverno e verão. Teste de Tukey ($p < 0,10$). *Soma das médias de inverno e verão.

A intensidade média anual de NO_3^- no solo em PD (4,5 g kg^{-1} dia), em PDE (4,4 g kg^{-1} dia) e em PC (4,1 g kg^{-1} dia), não se diferiu, contudo no verão ocorreram as maiores concentrações em PD e em PDE, numa concentração similar de 2,7 $\text{g NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ dia, em relação ao solo em PC (2,3 $\text{g NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ dia). De modo geral, a concentração de NO_3^- no solo sob sistemas de preparo foi maior no verão em relação ao inverno (Tabela 3).

Em análise de correlação entre intensidade de NH_4^+ e emissão acumulada de N_2O nas cinco safras avaliadas foram obtidos elevados coeficientes de determinação no solo em PD ($r^2 = 0,75$) e em PDE ($r^2 = 0,67$), mas relação praticamente nula em PC ($r^2 = 0,07$) (Figura 7 a).

Para a correlação entre a intensidade de NO_3^- e emissão acumulada de N_2O nas cinco safras avaliadas houve mesma tendência que na correlação com a intensidade de NH_4^+ , foram obtidos elevados coeficientes de determinação no solo em PD ($r^2 = 0,80$) e em PDE ($r^2 = 0,67$), e menor relação no solo em PC ($r^2 = 0,20$) (Figura 7 b).

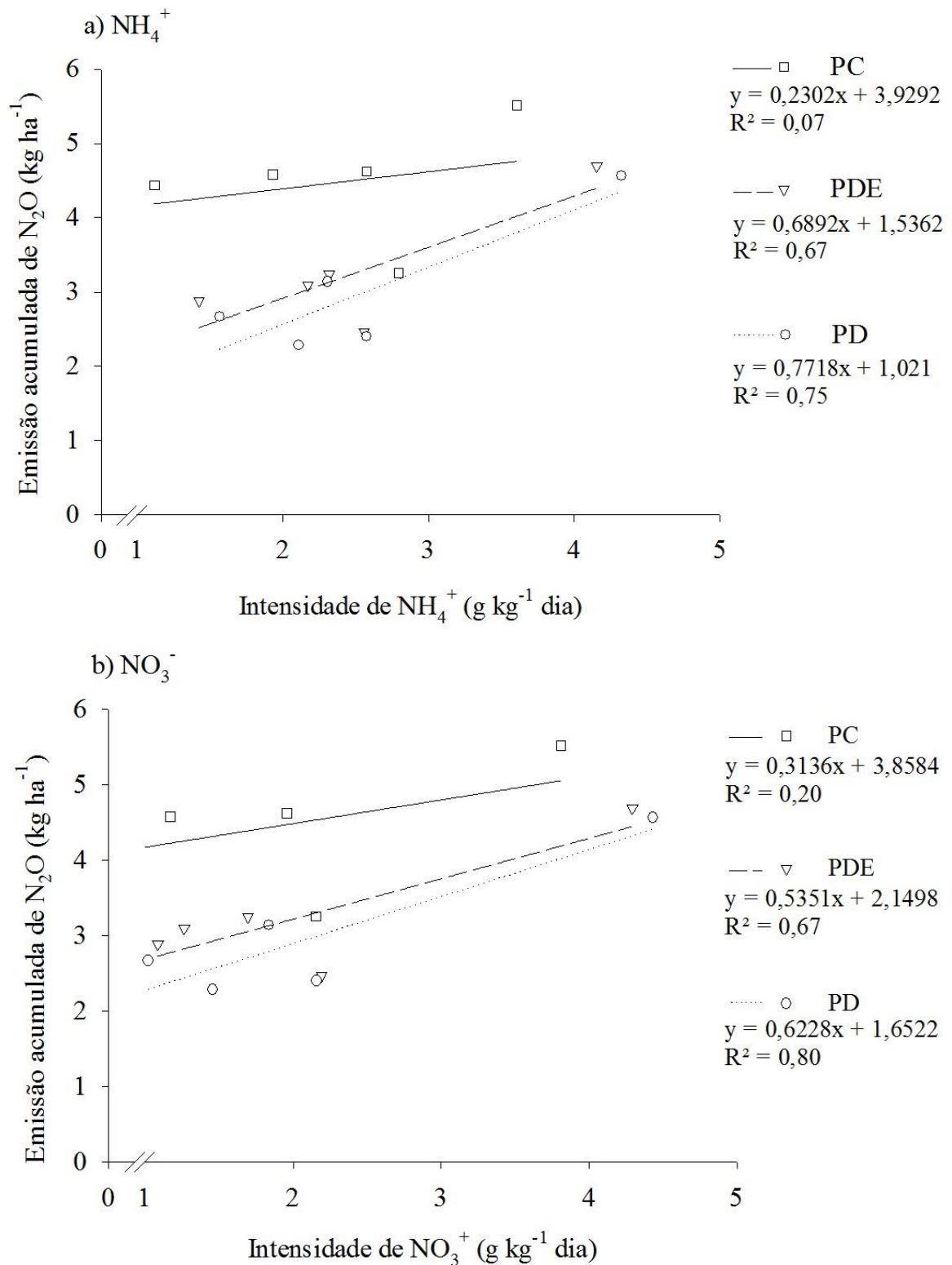


FIGURA 7. Relação entre intensidade de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) com a emissão acumulada de N_2O de Latossolo Vermelho sob preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) em cinco safras entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, $25^\circ 00' 53''\text{S}$ e $50^\circ 09' 07''\text{O}$).

2.3.3. Precipitação e temperatura do ar

A precipitação pluviométrica média foi 954 mm no verão, contabilizando soja e milho, e no inverno, a média foi 496 mm, contabilizando trigo, aveia preta e aveia branca, sendo no verão, portanto, observados os maiores índices de chuva. A temperatura média diária do ar foi maior no verão (21,1 °C) e menor no inverno (15,2 °C). A maior temperatura média diária ocorreu no verão (26 °C) no dia 04/02/2014 e a menor no inverno (7,5 °C) no dia 28/08/2013. Dados diários de precipitação e temperatura do ar estão apresentados na Figura 8.

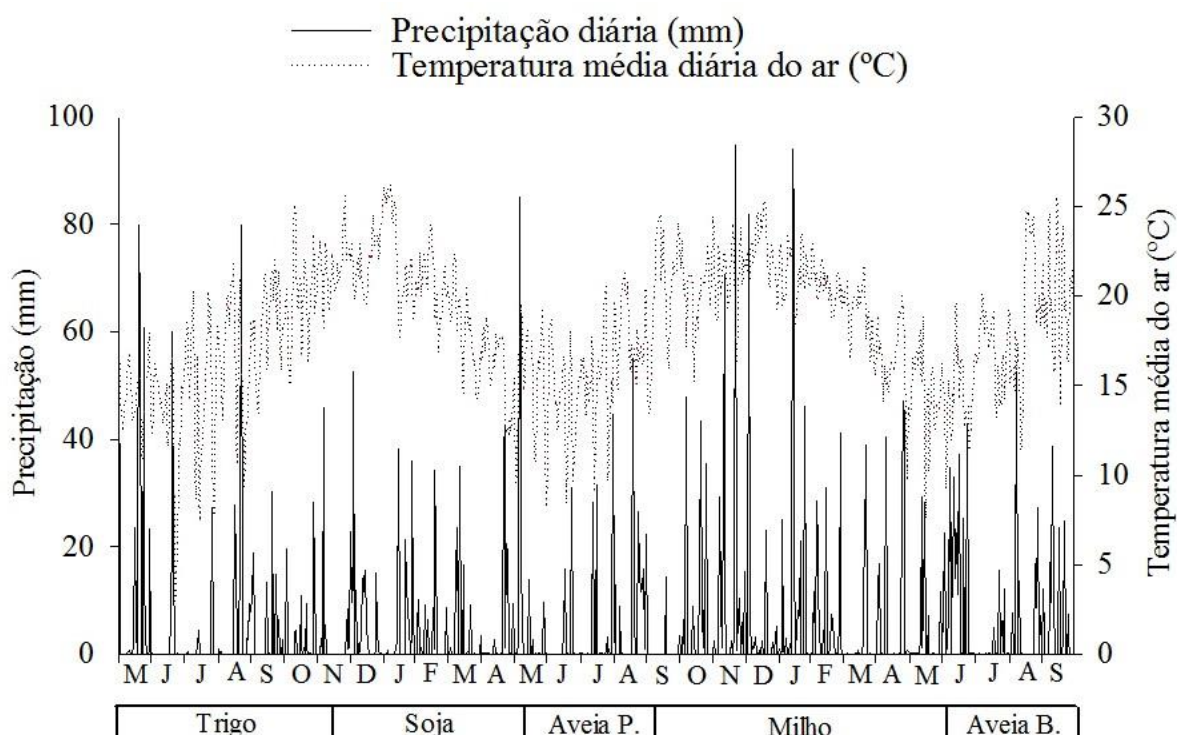


FIGURA 8. Precipitação e temperatura média diária do ar durante o período de avaliação das emissões de N_2O e CH_4 . Fonte: Estação Agrometeorológica de Ponta Grossa, campo experimental da Fundação ABC (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Em análise de correlação entre precipitação diária com os fluxos de N_2O (Figura 9a) e de CH_4 (Figura 9b) não foram obtidos coeficientes de determinação significativos para os tratamentos PC, PDE e PD.

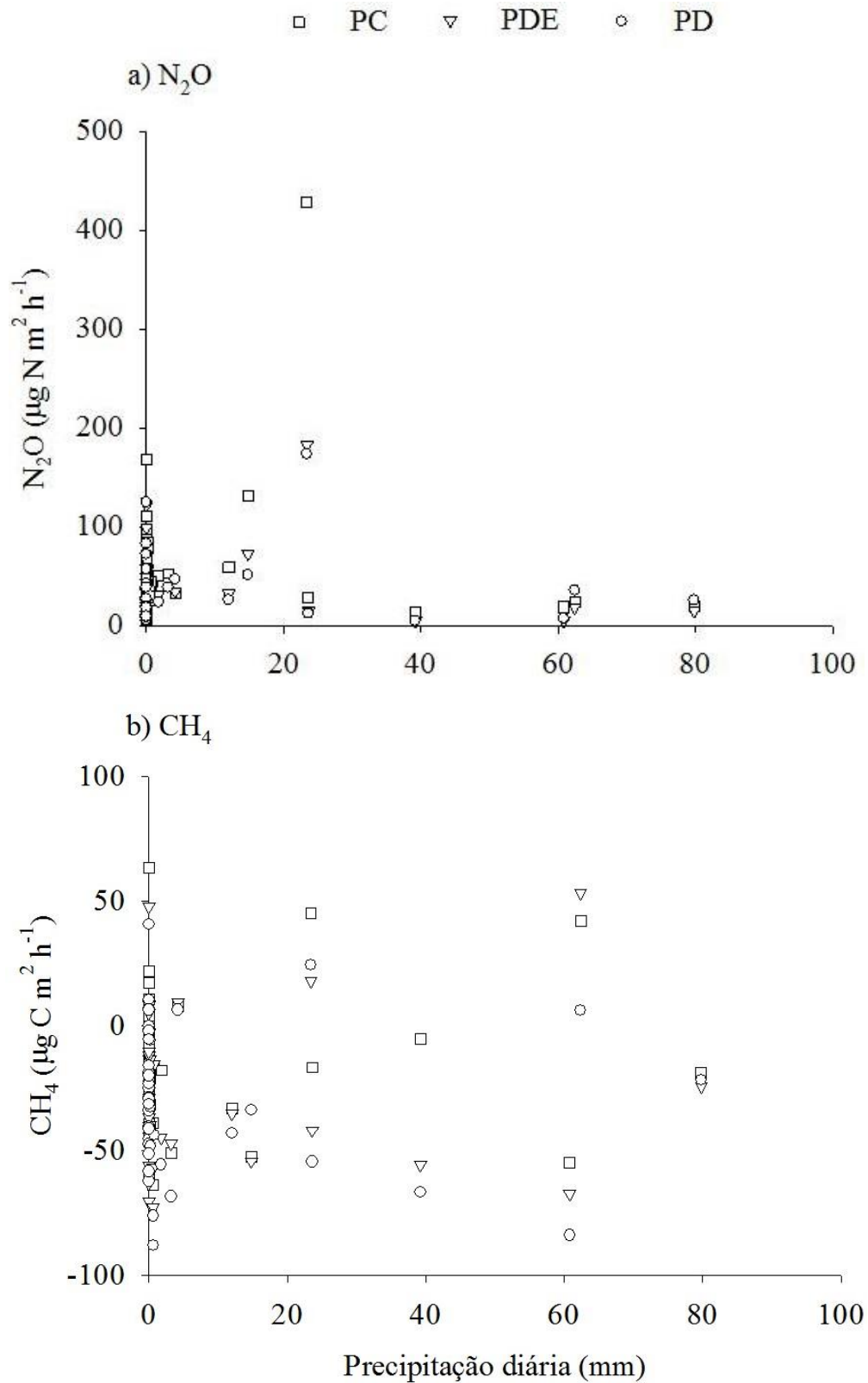


FIGURA 9. Relação entre fluxo de N_2O (a) e de CH_4 (b) com a precipitação diária para os tratamentos: preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, 25°00'53"S e 50°09'07"O).

Em análise de correlação entre temperatura média diária com os fluxos de N_2O (Figura 10a) e de CH_4 (Figura 10b) não foram obtidos coeficientes de determinação significativos para os tratamentos PC, PDE e PD.

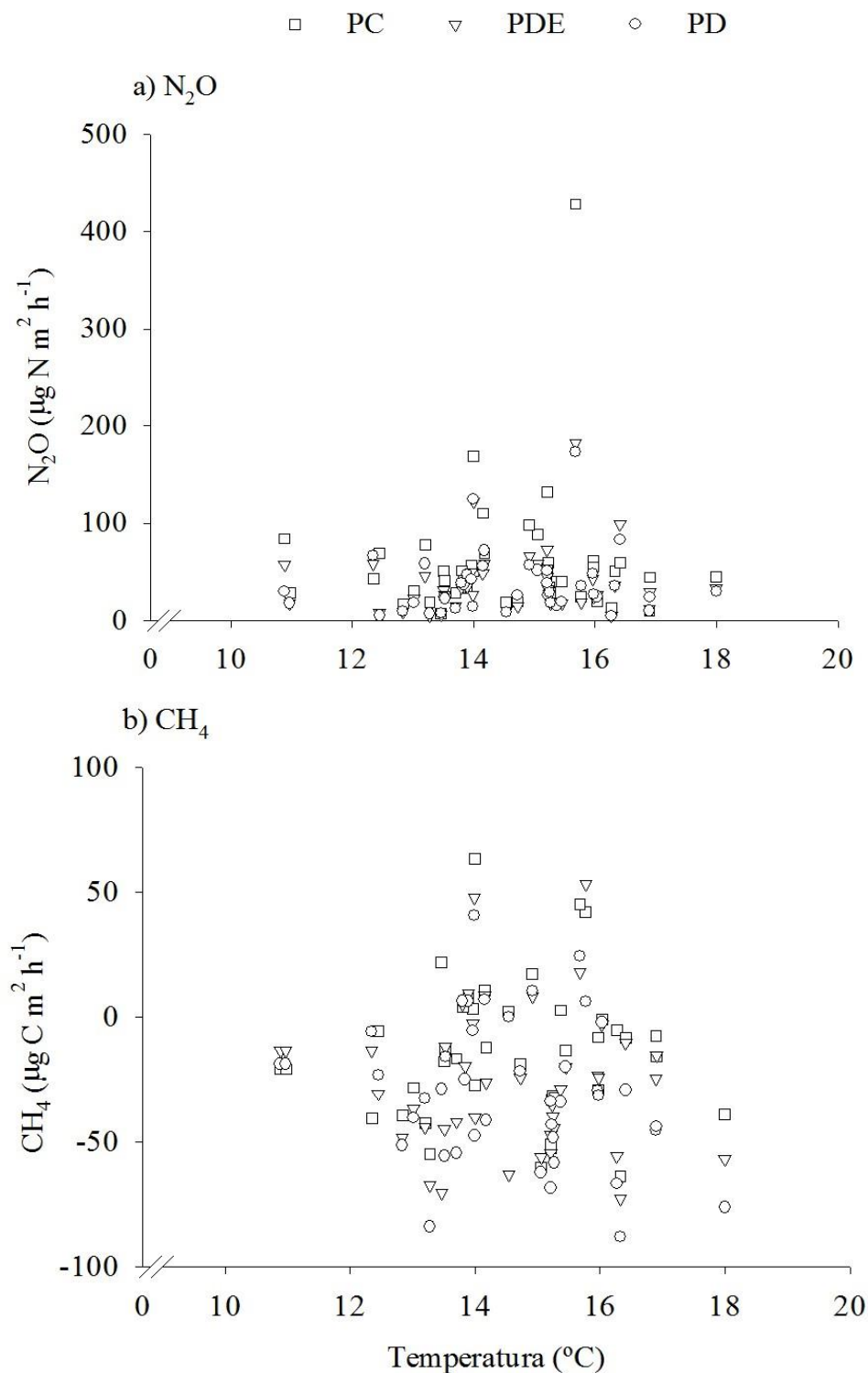


FIGURA 10. Relação entre fluxo de N_2O (a) e de CH_4 (b) com a temperatura média do ar para os tratamentos: preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) entre maio de 2013 e setembro de 2015. (Ponta Grossa, Paraná, $25^{\circ}00'53''\text{S}$ e $50^{\circ}09'07''\text{O}$).

2.3.4. Custo de operações e insumos agrícolas em C-CO₂-eq

Os resultados para custos totais, operacionais e agrícolas, foram realizados contabilizando duas safras de verão e três safras de inverno (Tabela 4). O sistema PC apresentou os maiores custos totais (466,7 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) em relação aos sistemas PD (415,9 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) e PDE (419,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹), que apresentaram resultados mais próximos entre si. O custo associado aos insumos culturais representou a maior parte (366,0 kg C-CO₂-eq ano⁻¹) e não diferiu entre os sistemas, pois o experimento conta com o mesmo sistema de culturas em rotação (Tabela 5), enquanto o custo associado às operações representou a menor parte, média de 68,1 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹ entre os três sistemas. O maior custo operacional ocorreu no sistema PC (100,7 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) em relação aos sistemas PD (49,9 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) e PDE (53,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹).

TABELA 4. Emissão de CO₂ equivalente com relação às práticas agrônômicas (operações e insumos) dos sistemas: preparo convencional (PC), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) em três safras de inverno e duas safras de verão.

Fonte		Custos (kg C-CO ₂ eq ha ⁻¹)			Observações
		PC	PDE	PD	
Operações					No gasto de combustível por operação utilizou-se fator de conversão de 0,80 kg CO₂eq L⁻¹ (Lal, 2004).
Aração e escarificação		91,4	9,6	-	Cinco arações no PC (22,9 L ha ⁻¹ cada) e uma escarificação no PDE (12,0 L ha ⁻¹ cada).
Gradagem niveladora		35,6	-	-	Dez gradagens (4,45 L ha ⁻¹ cada), sendo duas operações realizadas antes de cada cultivo.
Semeadura		34,3	34,3	34,3	Cinco operações de semeadura (8,6 L ha ⁻¹ cada) de mesmo gasto de combustível entre os sistemas.
Adubação de cobertura		2,9	2,9	2,9	Três adubações de cobertura (1,2 L ha ⁻¹ cada) no trigo, no milho e na aveia branca.
Aplicação de pesticidas		36,4	36,4	36,4	Trinta e cinco pulverizações (1,3 L ha ⁻¹ cada): nove (trigo), treze (soja), quatro (aveia preta), cinco (milho) e quatro (aveia branca).
Colheita		51,2	51,2	51,2	Uma colheita de trigo (12,8 L ha ⁻¹), de soja (12,8 L ha ⁻¹), de milho (25,6 L ha ⁻¹) e de aveia branca (12,8 L ha ⁻¹).
Total de operações		251,8	134,4	124,8	
Insumos					
Sementes		32,0	32,0	32,0	0,1; 0,2; 0,1; 1,0 e 0,1 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ de sementes para trigo, soja, aveia preta, milho e aveia branca, respectivamente (West e Marland, 2002). 135,0; 23,6; 45,0; 23,6 e 90,0 kg ha ⁻¹ de sementes para o trigo, aveia branca e soja (Lal 2004).
Fertilizantes	Nitrogênio	493,4	493,4	493,4	1,3kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ N (Lal, 2004). Total de N aplicado: 379,5 kg N ha ⁻¹ , sendo 120; 180 e 79,5 kg N ha ⁻¹ para trigo, milho e aveia branca, respectivamente. Soja e aveia preta não receberam N.
	Fósforo	55,2	55,2	55,2	0,2 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ P ₂ O ₅ (Lal, 2004). Total de P ₂ O ₅ aplicado: 276,0 kg ha ⁻¹ , sendo 60; 60; 96 e 60 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ para trigo, soja, milho e aveia branca, respectivamente. Aveia preta não recebeu P.
	Potássio	49,5	49,5	49,5	0,15 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ K ₂ O (Lal, 2004). Total de K ₂ O aplicado: 330,0 kg ha ⁻¹ , sendo 60; 60; 150 e 60 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ para trigo, soja, milho e aveia branca, respectivamente. Aveia preta não recebeu K.
Pesticidas	Herbicida	219,2	219,2	219,2	6,3 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ herbicida (Lal, 2004). 8,8; 4,8; 11,7; 2,1 e 7,4 kg de ingrediente ativo ha ⁻¹ para trigo, soja, aveia preta, milho e aveia branca, respectivamente, num total de 34,8 kg ha ⁻¹ de herbicida.
	Inseticida	51,9	51,9	51,9	5,1 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ inseticida (Lal, 2004). 0,9; 1,1; 0,7 e 7,6 kg de ingrediente ativo ha ⁻¹ para trigo, soja, milho e aveia branca, respectivamente, num total de 10,3 kg ha ⁻¹ de inseticida. Não houve aplicação na aveia preta.
	Fungicida	13,7	13,7	13,7	3,9 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ fungicida (Lal 2004). 1,5; 1,4; 0,1 e 0,5 kg de ingrediente ativo ha ⁻¹ para trigo, soja, milho e aveia branca, respectivamente, num total de 3,5 kg ha ⁻¹ de fungicida. Não houve aplicação na aveia preta.
Total de insumos		914,9	914,9	914,9	Não houve diferenças entre os tratamentos, pois os sistemas têm o mesmo sistema de culturas em rotação.
TOTAL		1166,7	1049,3	1039,7	Valor total considerando as cinco safras avaliadas, sendo duas de verão e três de inverno.

As informações de gastos de combustível (diesel) e quantidade/massa de sementes foram concedidas pela Fundação ABC, Castro (PR).

TABELA 5. Custos em CO₂ equivalente pelos sistemas de preparo do solo.

Sistema de preparo	Custos (kg C-CO ₂ -eq ha ⁻¹)						
	Total no ciclo			Nº de anos*	Média anual		
	Operação	Insumo	Total		Operação	Insumos	Total
PC	251,8	914,9	1166,7	2,5	100,7	366,0	466,7
PDE	134,4	914,9	1049,3	2,5	53,8	366,0	419,8
PD	124,8	914,9	1039,7	2,5	49,9	366,0	415,9

* Foram contabilizadas três safras de inverno e duas safras de verão.

2.3.5. Potencial de aquecimento global (PAG)

Todos os sistemas de preparo do solo agiram como fonte de GEE para a atmosfera (Tabela 6), com um valor médio de 958,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹, o sistema PD obteve o menor PAG (569,6 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹), o sistema PDE obteve um PAG intermediário (660,5 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹), porém de maior proximidade ao PAG do PD, enquanto o sistema PC obteve o maior (1646,3 kg C-CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹), sendo que em média, a emissão de N₂O foi o fator que mais contribuiu para o maior PAG nesse sistema representando 71,5 %, seguido do maior custo que representou 28,5 %. Nos sistemas PD e PDE houve maior contribuição dos custos, pois apresentaram menor emissão de N₂O comparado ao sistema PC. Todos os sistemas oxidaram CH₄, porém o efeito no PAG foi pouco significativo, devido à baixa quantidade oxidada.

TABELA 6. Potencial de Aquecimento Global (PAG) para os sistemas de preparo do solo baseado no sequestro de C, emissão de gases do efeito estufa (GEE) e custos de insumos e operações. Sinal negativo indica potencial de mitigação do aquecimento global em C-CO₂eq.

Sistema de preparo	kg C-CO ₂ - eq ha ⁻¹ ano ⁻¹					
	N ₂ O	CH ₄	C ⁽¹⁾	Custos	PAG	PAG relativo ⁽²⁾
PC	1213,1	-33,5	0	466,7	1646,3	0
PDE	893,4	-52,7	600	419,8	660,5	-985,8
PD	826,7	-63,0	610	415,9	569,6	-1076,7

(1) Dados de sequestro de C em 0-30 cm para solo em PD e em 0-45 cm para solo em PDE, descritos no capítulo 1.

(2) PAG de cada sistema subtraído pelo PAG do sistema PC.

O sequestro de C em PD e PDE não foi suficiente para contrabalancear o Ceq emitido pela emissão combinada do N₂O e dos custos, não representando, portanto uma efetiva contribuição na mitigação dos GEE, porém, quando comparado ao sistema PC, o PD e PDE

apresentaram potencial de mitigação de GEE (-1076,7 e -985,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente), conforme o PAG relativo (Tabela 6).

2.4. DISCUSSÃO

2.4.1. Emissão de N₂O e CH₄

Com base na emissão acumulada média, solo sob PC foi o que mais emitiu N₂O comparado ao solo sob PD e PDE (Tabela 2). Maiores fluxos de N₂O em PC ocorreram de 7 a 20 dias após preparos do solo, adubação nitrogenada de semeadura, que eram realizadas preferencialmente no mesmo dia (Figura 2a).

Picos de emissão do solo em PC, atribuídos ao revolvimento do solo, supostamente ocorreram por indução da mineralização do N contido nos resíduos de trigo, soja, aveia preta e milho, sendo a maior evidência do efeito do preparo do solo na emissão de 124 µg N-N₂O m² h⁻¹ ocorrida no cultivo de aveia preta, onde não foi aplicado nitrogênio na semeadura, sendo essa taxa registrada 20 dias após a incorporação de resíduos de soja da safra anterior, colhida 6 dias antes. De acordo com Baggs et al (2000), os maiores fluxos de N₂O observados após a incorporação dos resíduos no solo estão relacionados a uma estimulação rápida de decomposição microbiana e aumento do fornecimento de substrato, pelo maior contato solo-resíduo, para a nitrificação e desnitrificação, processos de formação de N₂O, que podem ou não ocorrer simultaneamente (Khalil et al., 2004; Zanatta et al., 2010, Brevilieri e Dieckow, 2015), embora a desnitrificação seja o processo dominante na produção de N₂O (Davidson et al., 1996).

Baggs et al (2000) ressaltam que a emissão de N₂O induzida por mineralização de N-resíduo ocorre dentro de duas semanas aproximadamente, corroborando com resultados encontrados nesse experimento, exceto no período de inverno e cultivo de aveia preta, onde ocorreu um pico 20 dias após o preparo do solo no PC. Em conformidade, Piva et al (2012) observaram picos de N₂O entre 7 a 12 dias e outro, 30 dias após o preparo do solo no outono, em Latossolo subtropical. Pelas razões apresentadas, atribuídas ao preparo do solo, muitos trabalhos na literatura corroboram com menor emissão de N₂O em PD comparado ao convencional pela preservação da estrutura do solo e redução de taxas de mineralização (Passianoto et al., 2003; Malhi et al., 2006; Chatskikh e Olesen, 2007; Gregorich et al., 2008; Ussiri et al., 2009; Mutegi et al., 2010; Petersen et al., 2011).

No caso do solo em PDE, a escarificação ocasionou um pico de $108 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ no 10º dia, que pode estar relacionado ao favorecimento da mineralização do resíduo de soja da safra anterior, bem como demais resíduos acumulados na superfície do solo nos três anos precedentes ao evento, pelo maior contato do solo-resíduo que acelerou a taxa de decomposição e produziu N_2O . Mesmo com esse pico após escarificação, a emissão acumulada média anual do solo em PDE ($6,7 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) não diferiu do solo em PD ($6,2 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) (Tabela 2). Quanto à mitigação de N_2O resultados obtidos nesse trabalho para o solo em PD e PDE diferem de alguns autores que relatam maior emissão de N_2O por desnitrificação através da maior umidade e densidade do solo e menor porosidade de aeração (Mackenzie et al., 1997; Ball et al., 1999; Baggs et al., 2003). Com relação à estrutura do solo, o PD quando manejado em condições adequadas de umidade e sem tráfego excessivo de máquinas pode não apresentar elevado grau de compactação. De acordo com Silva et al (2006), o revolvimento de Latossolo no PC propicia melhor condição de aeração inicial, mas posteriormente pode existir um adensamento expressivo na superfície. Emissões similares entre solo em PD e PC também foram encontrados, nas regiões Subtropical (Jantalia et al., 2008) e Tropical (Metay et al., 2007; Siqueira-Neto et al., 2011).

Aliada ao contato solo-resíduo, a aplicação de N nesse experimento pode ter induzido uma elevada atividade microbiana pela maior disponibilidade de N-inorgânico que estimulou o desenvolvimento das culturas, aumentando a produção de matéria seca ocasionando um favorecimento na mineralização do N da matéria orgânica no solo que serviu de fonte de energia aos microrganismos decompositores, num suposto efeito “priming” (Jenkinson et al., 1985). O efeito do N-fertilizante no aumento da emissão de N_2O foi relatado amplamente (Bouwman et al., 2002, Baggs et al., 2003, Gomes et al., 2009, Zanatta et al., 2010, Smith et al., 2012, Piva et al., 2012).

No verão de 2013/14, houve maiores fluxos de N_2O , se comparado a média do período, no PD ($92 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e PC ($78 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$) no período que a soja entrava em senescência e pode estar associado à decomposição de nódulos radiculares e folhas caídas que elevaram o aporte de nitrogênio no solo favorecendo a emissão direta de N_2O . Picos de N_2O emitidos nesse período corroboram com Zotarelli (2000), Ciampitti et al (2008), Albuquerque (2012) e Pergher (2014).

Nesse estudo, solo em PD e PDE absorveu mais CH_4 comparado ao sistema convencional (Tabela 2), reflexo dos menores efluxos desse gás durante o período avaliado (Figura 2b). O não revolvimento do solo pode ter favorecido a população de bactérias

metanotróficas, hábeis em utilizar o CH_4 como fonte de carbono e energia. Nesse sentido, o preparo do solo pode modificar a população das bactérias que oxidam o CH_4 através das perturbações físicas que ocorrem durante o revolvimento (Kessavalou et al, 1998; Smith et al., 2003; Ussiri et al, 2009; Brevilieri e Dieckow, 2015). A aeração presente no Latossolo bem manejado pode também reduzir a emissão de CH_4 através da menor atividade das bactérias metanogênicas que, em condições restritas de O_2 , oxidam os compostos orgânicos a CH_4 .

Picos de CH_4 foram observados após eventos de adubação nitrogenada, que aumentaram as concentrações de N inorgânico no solo (Figura 4). Elevadas concentrações de N na forma de NH_4^+ inibem a oxidação do CH_4 no solo, devido à competição do íon NH_4^+ com o CH_4 , pela enzima mono-oxigenase, por esta ter pouca especificidade pelo CH_4 , passa oxidar o NH_4^+ (Boeckx et al., 1997; Bodelier e Laanbroek, 2004).

Segundo Hustch (1998), ha também uma interferência na oxidação do CH_4 em longo prazo, pelo poder de acidificação do solo decorrente da adubação nitrogenada, a qual irá diminuir a capacidade de estabelecimento das bactérias metanotróficas, diminuindo a capacidade do mesmo em absorver CH_4 .

2.4.2. Atributos de solo

Não foram encontradas correções significativas com temperatura do solo e porosidade com água (PPA), contudo maior emissão de N_2O no solo em PDE ($118,9 \mu\text{g N m}^2 \text{ h}^{-1}$) e PD ($92,8 \mu\text{g N m}^2 \text{ h}^{-1}$) ocorreu quando as porcentagens atingiram 84,5 e 78,2 nesses sistemas, respectivamente, no verão, possivelmente por desnitrificação devido à escassez de O_2 , pela maior precipitação do período registrada em dias anteriores (Figura 8). Os valores de PPA ficaram abaixo de 70 % na maior parte do período avaliado, a maior profundidade e boa drenagem dos Latossolos pode ter contribuído para isso. Bateman e Baggs (2005) encontraram que todo o N_2O emitido no solo com mais de 70 % de PPA foi oriundo da desnitrificação, enquanto a produção desse gás por nitrificação ocorreu em condição de 35 a 60 %. Zanatta et al (2010) encontraram maior emissão de N_2O num Gleissolo subtropical com PPA acima de 70 %, indicando a desnitrificação como processo predominante de formação desse gás.

Conforme modelo proposto por Neil et al (2005), o N_2O é predominantemente derivado da nitrificação em baixos e moderados valores de umidade do solo, enquanto a desnitrificação é o principal processo de formação desse gás quando mais de 60 % do espaço poroso do solo está preenchido com água pelo decréscimo de O_2 . Os resultados encontrados

por Merino et al. (2004) indicam menor emissão com baixos valores de PPA em sistemas de preparo do solo. Experimentos na região Tropical reforçam esses resultados, mas ressaltam tendência de aumento nas emissões após eventos de chuva ou adubação nitrogenada (Passionato et al., 2003; Jantália et al., 2008; Gomes et al., 2009).

2.4.3. PAG

Com base nos resultados de PAG, todos os sistemas favoreceram a emissão de GEE em C-eq para a atmosfera por apresentarem PAG positivo (Tabela 5), isso está relacionado, principalmente, à emissão de N_2O que foi favorecida basicamente por dois fatores: pela adubação nitrogenada, principalmente quando realizada em cobertura nas culturas com destaque para o milho, onde foi utilizada uma elevada dose de N nos sistemas, contribuindo para maior formação e liberação de N_2O (Tabela 2).

O segundo fator foi o revolvimento do solo ocorrido duas vezes ao ano no PC, uma vez que foram observados elevados fluxos de N_2O entre 7-20 dias após essas operações (Figura 2 a). Nesse sentido, o preparo do solo no PC intensificou a mineralização do N do resíduo e sua liberação na forma de N_2O , contribuindo, portanto, em maior emissão acumulada de N_2O nesse sistema comparado, por exemplo, ao PD. No PDE, a escarificação do solo no inverno de 2014 favoreceu maior emissão de N_2O (Figura 2 a), contudo teve menor impacto na emissão acumulada de N_2O pela menor ocorrência dessa operação que é a cada três anos, se comparado ao revolvimento do solo mais frequente no PC, duas vezes ao ano.

Para o PAG, Robertson et al (2000), ao adotarem um sistema convencional como linha de base, verificaram um PAG negativo de $-200 \text{ kg C-CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no PD em sistema perene de alfafa, os autores atribuíram esse resultado principalmente à elevada taxa de sequestro de C ($1,6 \text{ Mg C ha ano}^{-1}$) do solo em PD, seguido da menor emissão de N_2O pela ausência de adubação nitrogenada, e também ao uso reduzido de combustível por operações.

Quanto ao CH_4 , houve absorção em todos os sistemas, contudo teve efeito pouco significativo no PAG pela baixa quantidade oxidada desse gás por influência dos sistemas de preparo de solo.

O potencial de mitigação do aquecimento global no PD ($1076,7 \text{ kg C-CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e PDE ($985,8 \text{ kg C-CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em relação ao PC foi permitido, além de menor emissão de GEE, pelo sequestro de C no solo desses sistemas, sendo que o potencial de aquecimento encontrado no PC foi 2,9 e 2,5 vezes superior ao do PD e PDE, respectivamente.

O maior PAG obtido no PC pode ser explicado também pelo custo total mais elevado nesse sistema comparado ao PD e PDE (Tabela 4 e 5). Mesmo não havendo diferenças para o custo com insumos, uma vez que os tratamentos têm o mesmo sistema de culturas em rotação, o custo com operações agrícolas no PC (100,7 kg C-CO₂-eq ha⁻¹) superou 50,4 % e 46,6 %, respectivamente, o custo do PD (49,9 kg C-CO₂-eq ha⁻¹) e PDE (53,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹), em função de operações com arado de discos e gradagem niveladora.

2.5. CONCLUSÕES

Plantio direto ou plantio direto escarificado são alternativas promissoras na mitigação de emissão de N₂O, possivelmente pela redução da taxa de mineralização de resíduos resultante do não revolvimento do solo;

Plantio direto ou plantio direto escarificado são eficientes na absorção de metano comparado ao sistema convencional, possivelmente pela melhor condição estrutural do solo atribuída à qualidade física pela manutenção da matéria orgânica que estimula a metanotrofia;

Plantio direto ou plantio direto escarificado atuam como fonte de gases de efeito estufa por apresentarem Potencial de Aquecimento Global positivo, mas apresentam potencial de mitigação do aquecimento global em relação ao sistema de preparo convencional pelo sequestro de carbono no solo, menor emissão de GEE e baixo custo.

2.6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao professor Cimélio Bayer e as pós-doutorandas Daiane Carvalho dos Santos e Cecília Sacramento, pelos auxílios prestados nas análises cromatográficas.

2.7. LITERATURA CITADA

- ALBURQUERQUE, M.A. Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em plantio direto. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, 2012. 90p. (Dissertação - Mestrado).
- AMADO, T.J., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P.C., SPAGNOLLO, E., COSTA DE CAMPOS, B.H. e DA VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *Journal of Environmental Quality* 35, 1599–1607, 2006.

- BAGGS, E. M., REES, R. M., SMITH, K. A. e VINTEN, A. J. A. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. *Soil Use Manag.* 16(2):82–87, 2000.
- BAGGS, E. M.; STEVENSON, M.; PIHLATIE, M.; REGAR, A.; COOK, H. e CADISCH, G. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. *Plant Soil*, 254:361-370, 2003.
- BALL, B. C.; SCOTT, A. e PARKER, J. P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil Tillage Res.*, 53:29-39, 1999.
- BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils*, 41: 379-388, 2005.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L. e FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54:101-109, 2000.
- BLAKE, G.R. e HARTGE, K.H. Bulk density. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Ed. Madison. 2 ed. Madison, WI, 1986 p. 363- 382.
- BODELIER, P. L. E. e LAANBROEK, H. J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, V.47, p. 265-277, 2004.
- BOECKX, P.; CLEEMPUT, V.; e VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Dordrecht, v.49, n.1-3, p. 91-95, 1997.
- BOUWMAN, A. F., BOUMANS, L. J. M. e BATJES, N. H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data. *Global Biogeochemist. Cycle* 16(4):1058. doi:10.1029/2001GB001811, 2002.

- BREVILIERI, R. C. e DIECKOW, J. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa em solos agrícolas e florestais como indicador de serviços ambientais. In: PARRON, L. M., GARCIA, J. R., OLIVEIRA, E. B., BROWN, G. G., PRADO, R. B., editores. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, Embrapa, 2015.p.109-121.
- BURTON, D. L.; ZEBARTH, B. J.; K. M. GILLAM, K. M. e MACLEOD, J. A. Effect of split application of fertilizer nitrogen on N₂O emissions from potatoes. *Canadian Journal of Soil Science* 88(2): 229-239.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; MAIA, S.M.F.; CERRI, C.E.P.; COSTA-JUNIOR, C.; FEIGL, B.J.; FRAZÃO, L.A.; MELLO, F.F.D.; GALDOS, M.V.; MOREIRA, C.S. e CARVALHO, J.L.N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. *Sci. Agric.*, 67:102-116, 2010.
- CHATSKIKH, D. e OLESEN, J.E. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil Tillage Res.*, 97:5-18, 2007.
- CHATSKIKH, D. e OLESEN, J.E. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil Tillage Res.*, 97:5-18, 2007.
- CIAMPITTI, I.A.; CIARLO, E.A. e CONTI, M.E. Nitrous oxide emissions from soil during soybean [(Glycine max (L.) Merrill] crop phenological stages and stubbles decomposition period. *Biol. Fertil. Soils*, 44:581–588, 2008.
- DAVISON, E. A.; MATSON, P. A. e BROOKS, P. D. Nitrous oxide emission control and inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, n.4, p.1145-1152, 1996.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. e KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil and Tillage Research*, 81:87-95, 2005.

- EMBRAPA/FUNDAÇÃO ABC. Levantamento semidetalhado de solos – Município de Castro. Relatório Interno. Castro-PR: EMBRAPA/SOLOS, EMBRAPA/FLORESTAS, FUNDAÇÃO ABC, 2001. 86p.
- ESCOBAR, L.F.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CHAVEZ, L.F.; ZANATTA, J.A. e FIORIN, J.E. Postharvest nitrous oxide emissions from a subtropical Oxisol as influenced by summer crop residues and their management. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 34:507-516, 2010.
- GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. S.; PICCOLO, M. C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F.C.B.V. e SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. *Soil & Tillage Research*, 106: 36-44, 2009.
- GREGORICH, E.G.; ROCHETTE, P.; ST-GEORGES, P.; MCKIM, U.F. e CHAN, C. Tillage effects on N₂O emission from soils under corn and soybeans in Eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 88:153-161, 2008.
- HEINZMANN, F.X.; MIYAZAWA, M. e PAVAN, M.A. Determinação de nitrato em extratos de solos ácidos por espectrofotometria de absorção ultravioleta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 8, p. 159-163, 1984.
- HÜTSCH, B. W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 27(3):284–292, 1998.
- JANTALIA, C.P.; DOS SANTOS, H.P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. e ALVES, B.J.R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82:161-173, 2008.
- JENKINSON, D.S.; FOX, R.H.; RAYNER, J.H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called "priming effect". *Journal of Soil Science*, 36: 425-444, 1985.
- KESSAVALOU, A.; MOSIER, A.R.; DORAN, J.W.; DRIJBER, R.A.; LYON, D.J. e HEINEMEYER, O. Fluxes of Carbon Dioxide, Nitrous Oxide, and Methane in Grass Sod and Winter Wheat-Fallow Tillage Management. *J. Environ. Qual.* 27:1094-1104, 1998.

- KHALIL, K.; MARY, B.; RENAULT, P. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, 36:687-699, 2004.
- LAL, R. Carbon emission from farm operations. *Enviroments International* 30:981-990, 2004.
- MACKENZIE, A.F.; FAN, M.X. e CADRIN, F. Nitrous oxide emission as affected by tillage, corn-soybean-alfalfa rotations and nitrogen fertilization. *Can. J. Soil Sci.*, 77:145-152, 1997.
- MAJUMDER, B.; KUZYAKOV, Y. Effect of fertilization on decomposition of ¹⁴C labeled plant residues and their incorporation into soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 109, n. 2, p. 94-102, 2010.
- MALHI, S.S.; LEMKE, R.; WANG, Z.H. e CHHABRA, B.S. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil Tillage Res.*, 90:171-183, 2006.
- MCTI – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2^a ed. Brasília, 2014. 164p.
- MERINO, A.; BATALLON-PERÉZ, P.; MACIAS, F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biol. Biochemical*, 36:917-925, 2004.
- METAY, A.; OLIVER, R.; SCOPEL, E.; DOUZET, J.M.; ALVES MOREIRA, J.A.; MARAUX, F.; FEIGL, B.J. e FELLER, C. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiania (Cerrados, Brazil). *Geoderma*, 141:78-88, 2007.
- MOSIER, A.R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M.O. e SCHIMEL, D.S., ed. *Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop*. Berlin, Wiley, 1989. p.175-187.

- MOSIER, A.R.; HALVORSON, A.D.; PETERSON, G.A.; ROBERTSON, G.P. e SHERROD, L. Measurement of net global warming potential in three agroecosystems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 72:67-76, 2005.
- MULVANEY, R.L. Nitrogen – Inorganics forms. In: BARTELS, J.M.; BIGHAM, J.M.; SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTAMPAM, P.N.; TABATAI, M.A.; JOHNSON, C.T. e SUMMER, M.E. Eds. *Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical methods*. 5 ed. Madison, Soil Science Society of American Book Series, p. 1123-1184, 1996.
- MUTEGI, J.K.; MUNKHOLM, L.J.; PETERSEN, B.M.; HANSEN, E.M. e PETERSEN, S.O. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. *Soil Biol. Biochem.*, 42:1701-1711, 2010.
- PARKIN, T.; MOSIER, A.; SMITH, J.; VENTEREA, R.; JOHNSON, J.; REICOSKY, D.; DOYLE, G.; MCCARTY, G. e BAKER, J. Chamber-based trace gas flux measurement protocol. USDA-ARS GRACE net, 2003.
- PASSIANOTO, C.C.; AHRENS, T.; FEIGL, B.J.; STEUDLER, P.A.; DO CARMO, J.B. e MELILLO, J.M. Emissions of CO₂, N₂O, and NO in conventional and no-till management practices in Rondônia, Brazil. *Biol. Fertil. Soils*, 38:200-208, 2003.
- PERGHER, M. Emissão de óxido nitroso e metano do solo e de dejetos bovinos em sistemas integrados de produção com ILP e ILPF. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, 2014. 57p. (Dissertação - Mestrado).
- PETERSEN, S.O.; MUTEGI, J.K.; HANSEN, E.M. e MUNKHOLM, L.J. Tillage effects on N₂O emissions as influenced by a winter cover crop. *Soil Biol. Biochem.*, 43:1509-1517, 2011.
- PIVA, J. T.; DIECKOW, D.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, T. e PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. *Plant Soil*, 361:359–373, 2012.

- ROBERTSON, G.P.; PAUL, E.A. e HARWOOD, R.R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289:1922-1925, 2000.
- SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). SAS/STAT user's guide: version 8. Cary, 1999. 1243p.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F. e COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:842- 847, 2006.
- SIQUEIRA-NETO, M.; PICCOLO, M.D.; COSTA, C.; CERRI, C.C. e BERNOUX, M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 35:63-76, 2011.
- SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. e BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 76:39-58, 2004.
- SIX, J.; OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; CONANT, R.T.; MOSIER, A.R. e PAUSTIAN, K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Glob. Change Biol.*, 10:155-160, 2004.
- SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J. e REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 54:779–791, 2003.
- SMITH, K; WATTS, D.; WAY, T.; TORBERT, H. e PRIOR, S. Impact of Tillage and Fertilizer Application Method on Gas Emissions in a Corn Cropping System. *Pedosphere* 22(5): 604–615, 2012.

- USSIRI, D.A.N.; LAL, R. e JARECKI, M.K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil Tillage Res.*, 104:247-255, 2009.
- WEST, T.O. e MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 91:217–232, 2002.
- WEST, T. O. e POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:1930–1946, 2002.
- WILSON, T. M.; MCGOWEN, B.; MULLOCK, J.; ARNALL, B. e WARREN, J. G. Nitrous oxide emissions from continuous winter wheat in the southern great plains. *Agronomy, Soils & Environmental Quality*, v. 107, p. 1878-1884, 2015.
- ZANATTA, J. A., ALVES, B. J. R., BAYER, C., TOMAZI, M., FERNANDES A. H. B. M., COSTA, F. S. e CARVALHO, A. M. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. Ed 1a. Colombo: Embrapa Florestas; 2014 (Documentos, 265).
- ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; VIEIRA, F.C.B.; GOMES, J. e TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in South Brazilian Gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1653-1665, 2010.
- ZOTARELLI, L. Balanço de Nitrogênio na rotação de culturas em sistema plantio direto e convencional na região de Londrina-PR. Seropédica, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. 97p. (Dissertação - Mestrado).

CONCLUSÕES GERAIS

Sistemas conservacionistas de preparo do solo, como plantio direto ou plantio escarificado, são eficientes para acumular COT e NT no solo, sendo alternativas promissoras no aumento do estoque de matéria orgânica no solo (MOS) e na mitigação de CO₂;

Sistemas conservacionistas de preparo do solo, como plantio direto ou plantio escarificado, mitigam emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera em função do menor PAG em relação ao preparo convencional através do sequestro de carbono no solo, menor emissão de N₂O, maior consumo de CH₄ e reduzidos custos.

APÊNDICE



Fotos 1 e 2. Método de amostragem do solo. Escavação com espátula até 30 cm de profundidade (1) e utilização do trado cavador abaixo de 30 cm de profundidade (2).



Foto 3. Câmaras acopladas no ato das coletas das amostras de ar em todos os blocos.



Fotos 4 e 5. Isolamento da base (2x2 m) no ato da aplicação de N em cobertura no trigo, logo após aplicou-se N uniformemente nas parcelas isoladas (4). Aração com discos no PC (5).



Fotos 6 e 7. Gradagem niveladora no PC (6). Escarificação no PDE (7).